

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2015

Bc. Radek Adamec

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

VÝPOČET ZKRATOVÝCH PROUDŮ PRO
ROZVODNU KOČÍN 420 KV

CALCULATION OF SHORT-CIRCUIT
CURRENTS FOR 420 KV SUBSTATION
KOČÍN

2015

Bc. Radek Adamec

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Radek Adamec

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

Výpočet zkratových proudů pro rozvodnu Kočín 400 kV
Calculation of Short-circuit Currents for 400 kV Substation Kočín

Zásady pro vypracování:

1. V programu MODES vytvořte projekt rozvodny Kočín.
2. V projektu řešte případy všech druhů zkratu na přípojnicích.
3. Navrhněte rozšíření projektu pro případ dostavby JETE.

Seznam doporučené odborné literatury:

Dokumentace programu MODES.
Dokumentace rozvodny Kočín.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Věslav Mach**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 6. 5. 2015



Bc. Radek Adamec

Poděkování

Rád bych poděkoval společnosti ČEPS, a.s. za to, že mi umožnila vypracovat diplomovou práci a také za poskytnutí podkladů pro její vypracování. Jmenovitě bych rád poděkoval konzultantce Ing. Miloslavě Chladové, CSc. za cenné rady a připomínky k mé práci. Rád bych poděkoval i vedoucímu doc. Dr. Ing. Věslavovi Machovi za vedení při tvorbě diplomové práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval svojí rodině za nekončící podporu během celého studia.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá výpočtem zkratových proudů v rozvodně Kočín 420 kV. Výpočet je realizován prostřednictvím síťového simulátoru MODES na vytvořeném modelu rozvodny Kočín 420 kV.

V první části je popsáno vytvoření nového projektu v síťovém simulátoru MODES. Ve druhé části, jsou na přípojnicích vypočteny hodnoty počátečního rázového zkratového proudu prostřednictvím simulací zkratů v software MODES. Na základě těchto hodnot je určeno nejhorší místo vzniku zkratu v uzlu na přípojnicích. Poslední část této práce se zabývá rekonstrukcí a rozšířením rozvodny pro případ dostavby jaderné elektrárny Temelín.

Klíčová slova

rozvodna Kočín; MODES, zkrat; zkratový proud; třífázový; počáteční souměrný rázový zkratový proud; zkratový příspěvek; přípojnice; jaderná elektrárna Temelín;

Abstract

This thesis deals with the calculation of short-circuit currents in the Kočín substation 420 kV. The calculation is carried via a network simulator MODES on a created model of the Kočín substation 420 kV.

The first part describes how to create a new project in the network simulator MODES. In the second part, are calculated values initial surge short-circuit current on the busbars through simulations of faults in software MODES. On the basis of these values is determined the worst place of a short circuit on the busbars. The last part deals with the reconstruction and expansion of substations in case of completion the Temelín nuclear power station.

Key words

Kočín substation, MODES, short-circuit; short-circuit current; three-phase, initial short-circuit current; short-circuit contribution; busbar; Temelín nuclear power station,

Seznam použitých symbolů a zkratk

B_0	(S)	susceptance pro nulovou složku
B_1	(S)	susceptance pro souslednou složku
i_0	(A)	proud na prázdno
I_{dyn}	(A)	dynamický proud
I_k''	(A)	počáteční souměrný rázový zkratový proud
I_{k3}''	(A)	počáteční souměrný rázový zkratový proud pro trojfázový zkrat
i_p	(A)	nárazový zkratový proud
I_k	(A)	efektivní hodnota ustáleného zkratového proudu
i_k	(A)	okamžitá hodnota nesouměrného střídavého zkratového proudu
I_r	(A)	jmenovitý proud
I_{rT}	(A)	jmenovitý proud transformátoru
I_{th}	(A)	ekvivalentní oteplovací proud
I_{max}	(A)	maximální zatížitelnost vedení
K_G	(-)	korekční součinitel korigované impedance generátoru
K_{SO}	(-)	korekční součinitel elektrárenského bloku
P_0	(W)	činný výkon transformátoru na prázdno
P_{dod}	(W)	činná dodávka výkonu
P_i	(W)	činný výkon v i -tém uzlu sítě
P_k	(W)	jmenovité ztráty transformátoru nakrátko
P_{krT}	(W)	jmenovité ztráty transformátoru nakrátko
P_{odb}	(W)	činný odběr výkonu
p_T	(-)	převod transformátoru
Q_i	(VAr)	jalový výkon v i -tém uzlu sítě
Q_{max}	(VAr)	horní mez dodávky jalového výkonu
Q_{min}	(VAr)	spodní mez dodávky jalového výkonu
Q_{odb}	(VAr)	jalový odběr výkonu
R_0	(W)	rezistence pro nulovou složku
R_1	(W)	rezistence pro souslednou složku
r_G	(%)	rozsah regulace napětí generátoru
R_G	(Ω)	rezistance generátoru
R_{Gf}	(Ω)	fiktivní rezistance generátoru
R_k	(Ω)	celková zkratová rezistance
r_T	(%)	rozsah regulace napětí transformátoru
R_T	(Ω)	rezistance transformátoru
R_V	(Ω)	rezistance venkovního vedení
S_i	(V·A)	Jmenovitý zdánlivý výkon v i -tém uzlu sítě
S_n	(V·A)	jmenovitý zdánlivý výkon
S_{rG}	(V·A)	jmenovitý zdánlivý výkon generátoru
S_{rT}	(V·A)	jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru
t_{CLER}	(s)	čas odepnutí zkratu
T_{d0}'	(s)	podélná přechodná časová konstanta naprázdno
T_{d0}''	(s)	podélná rázová časová konstanta naprázdno
t_{FOUL}	(s)	čas zkratu
T_m	(s)	mechanická časová konstanta stroje

T_q'	(s)	příčná přechodná časová konstanta na prázdkno
T_q''	(s)	příčná rázová časová konstanta na prázdkno
T_{saml}	(s)	vzorkovací perioda
U_{abs}	(V)	velikost napětí v uzlu
U_e	(V)	napětí ekvivalentního zdroje zavedeného v místě zkratu
u_{kr}	(%)	jmenovité napětí transformátoru nakrátko v procentech
U_n	(V)	jmenovité napětí
U_{n1}	(V)	napětí sítě na primární straně
U_{n2}	(V)	napětí sítě na sekundární straně
U_{nQ}	(V)	jmenovité napětí soustavy v bodě Q, kam je připojen elektrárenský blok
U_{rG}	(V)	jmenovité napětí generátoru
U_{Rr}	(%)	činná složka jmenovitého napětí transformátoru nakrátko
u_{Rr}	(%)	činná složka jmenovitého napětí transformátoru nakrátko v procentech
U_{rT}	(V)	jmenovité napětí transformátoru
U_{rTHV}	(V)	jmenovité napětí transformátoru na straně vyššího napětí
U_{rTLV}	(V)	jmenovité napětí transformátoru na straně nižšího napětí
X_0	(W)	reaktance pro nulovou složku
X_1	(W)	reaktance pro souslednou složku
X_d	(-)	podélná synchronní nesycená reaktance
X_d'	(-)	prvá přechodná nesycená podélná reaktance
X_d''	(-)	rázová reaktance generátoru
x_d''	(-)	poměrná rázová reaktance generátoru
X_d''	(Ω)	rázová reaktance generátoru
X_k	(Ω)	celková zkratová reaktance
X_q	(-)	příčná synchronní nesycená reaktance
X_q'	(-)	prvá přechodná nesycená příčná reaktance
X_T	(Ω)	reaktance transformátoru
$Z_{(0)}$	(Ω)	nulová složka zkratové impedance
$Z_{(1)}$	(Ω)	sousledná složka zkratové impedance
$Z_{(2)}$	(Ω)	zpětná složka zkratové impedance
Z_G	(Ω)	rázová impedance generátoru v komplexním tvaru
Z_{GK}	(Ω)	korigovaná impedance generátoru v komplexním tvaru
Z_k	(Ω)	celková zkratová impedance
Z_K	(Ω)	celková zkratová impedance v komplexním tvaru
Z_{rG}	(Ω)	jmenovitá impedance generátoru
Z_{SO}	(Ω)	zkratová impedance elektrárenského bloku v komplexním tvaru
Z_T	(Ω)	impedance transformátoru
Z_T	(Ω)	sousledná zkratová impedance transformátoru v komplexním tvaru
Z_{THV}	(Ω)	zkratová impedance blokového transformátoru na straně vyššího napětí v komplexním tvaru

c	(-)	napěťový součinitel
c_{\max}	(-)	napěťový součinitel pro výpočet maximálních zkratových proudů
f	(Hz)	frekvence
φ_{rG}	(°)	fázový úhel mezi napětím a proudem generátoru
κ	(-)	součinitel pro výpočet nárazového zkratového proudu
k_e	(-)	součinitel pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu
ω	(rad·s ⁻¹)	úhlová rychlost

ASEK	aktualizace státní energetické koncepce
ČEPS	Česká energetická přenosová soustava
ČEZ	České energetické závody
EU	Evropská unie
JETE	jaderná elektrárna Temelín
KSP	kombinovaný spínač přípojníc
MODES	síťový simulátor pro modelování elektrizačních soustav
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu
PDP	podélné dělení přípojníc
PQ	odběrový uzel
PS	přenosová soustava
PU	napájecí uzel
SW	software
TRISQ	řídící dispečerský systém
vvn	velmi vysoké napětí

Poznámka: V diplomové práci je zavedena tisková konvence a všechny pojmy související se síťovým simulátorem MODES jsou v textu označeny podtržením.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Projekt rozvodny Kočín	2
2.1	Elektrizační soustava	2
2.2	Elektrická stanice Kočín	2
2.2.1	Rozvodna Kočín 420 kV	3
2.3	Vytvoření nového projektu rozvodny Kočín 420 kV	5
2.3.1	Uzly	6
2.3.2	Vedení	7
2.3.3	Transformátory	8
2.3.4	Elektrárenské bloky	11
2.3.5	Přiřazení dynamických modelů elektrárenským blokům.....	12
2.3.6	Parametry pro výpočet nesymetrických stavů	13
2.4	Rozšíření zjednodušeného modelu	14
2.5	Ustálený chod rozvodny Kočín 420 kV	16
2.5.1	Zjednodušený model.....	16
2.5.2	Rozšířený model	18
3	Výpočet zkratů na přípojnicích	19
3.1	Výpočet počátečního souměrného rázového zkratového proudu pro třífázový zkrat na přípojnici dle ČSN EN 60909-0	20
3.1.1	Metoda ekvivalentního napěťového zdroje	21
3.1.2	Zkratová impedance jednotlivých prvků.....	22
3.1.3	Celková zkratová impedance ETE-B1	23
3.1.4	Počáteční souměrný rázový zkratový proud pro ETE-B1	24
3.1.5	Celková zkratová impedance ETE-B2	24
3.1.6	Počáteční souměrný rázový zkratový proud pro ETE-B2	24
3.1.7	Celkový počáteční souměrný rázový zkratový proud.....	24
3.2	Výpočet zkratů v uzlech na přípojnicích prostřednictvím MODES	24
3.2.1	Vytvoření scénáře	25
3.2.2	Výsledky výpočtu	26
3.2.3	FOUL třífázový zkrat na větvi	26
3.2.4	Nesymetrické poruchy	28
3.3	Určení nejhoršího místa vzniku zkratu v uzlu na propojených přípojnicích.....	30
3.3.1	Zkratové příspěvky	30

3.3.2	Analýza rozložení proudů při zkratu v daném uzlu	32
3.3.3	Ekvivalentní oteplovací proud.....	34
3.3.4	Nejhorší místo vzniku zkratu	35
4	Rekonstrukce a rozšíření rozvodny Kočín 420 kV pro případ dostavby JETE.....	38
4.1	Vyvedení nových jaderných zdrojů JETE 3 a 4	40
4.2	Posouzení zkratové odolnosti rozvodny	41
4.3	Navrhovaná úprava rozvodny Kočín	43
5	Závěr	45
	Literatura	47
	Seznam obrázků	48
	Seznam tabulek	49

1 Úvod

Žijeme v době, kdy je lidstvo na elektřině závislé a spotřeba elektřiny ve světě rok od roku roste. Provoz elektrizačních soustav se výrazně liší od všech síťových infrastruktur, od telekomunikačního systému nebo silniční sítě. Nesmírně důležité a náročné zároveň je udržovat v přenosové soustavě stálý kmitočet 50 Hz. Právě vysoká nebo nízká frekvence mohou způsobit výpadek několika prvků soustavy najednou a vést až k částečnému či úplnému rozpadu elektrizační soustavy - blackoutu. Několik blackoutů má Evropa již za sebou, ten poslední postihl nedávno¹ Turecko.

Tato diplomová práce se zabývá výpočtem zkratových proudů v rozvodně, která tvoří jeden z významných uzlů v rámci české přenosové soustavy. Na každém elektrickém zařízení je nutné kromě normálního provozního stavu nutné počítat se stavem poruchovým. Jedna z nejzávažnějších poruch, která se může na elektrickém silnoprůdém zařízení vyskytnout je zkrat, který nepříznivě působí na bezpečnost provozu. Dokonce i obyčejný zkrat může v kombinaci s jinými poruchami a nečekanými událostmi způsobit zmíněný blackout.

S poruchovými stavy je nutné počítat, připravit se na ně a analyzovat jejich dopady. K analýze, tedy k výpočtům se většinou používají softwary, takzvané síťové simulátory. Mezi hlavní výhody, zejména díky výpočetní technice, patří rychlost a přesnost výpočtu. Těchto softwarů je celá řada, pro výpočet zkratových proudů je v rámci této diplomové práce použit software MODES. Je to software, který slouží pro simulování přechodných dějů a je využíván zejména pro analýzy provozních stavů přenosové soustavy v rámci rozvoje a řízení přenosové soustavy.

Diplomová práce popisuje použití software MODES pro výpočet zkratových proudů. Cílem je na základě vypočtených hodnot pro všechny druhy zkratu na přípojnicích určit nejhorší místo vzniku zkratu v uzlu na propojených přípojnicích. Pro případ vyvedení dalších bloků jaderné elektrárny Temelín je řešeno rozšíření rozvodny Kočín a nejvhodnější možné uspořádání polí a přípojnic.

¹ 31.3.2015, 09:36 CET

2 Projekt rozvodny Kočín

V této kapitole je v první části rozebrán současný stav, dále detailně popsán postup vytvoření nového projektu rozvodny Kočín 420 kV v SW MODES a teoreticky rozebrán návrh jednotlivých prvků včetně výpočtu parametrů těchto prvků.

MODES je balík programů určený pro analýzu dynamického chování modelu elektrizační soustavy. Pro práci s programem je využíváno grafického rozhraní MODMAN. Pomocí dynamické simulace jsou zkoumány simulované změny v elektrizační soustavě, výsledky jsou zobrazeny prostřednictvím tzv. grafiky. Dynamická simulace spočívá v tom, že jsou zadány v časovém sledu zásahy, neboli změny, které jsou definovány uživatelem pomocí volby Scénář (viz kapitola 3.2.1). Model sítě je tvořen: [1]

- souhrnem uzlů – v MODES jsou parametry uzlů uloženy v souboru UST.DAT,
- větvemi, které spojují uzly – soubor VET.DAT,
- synchronními a asynchronními stroji (blok generátoru s blokovým transformátorem) připojenými do uzlů – soubor GEN.DAT.

2.1 Elektrizační soustava

Elektrizační soustava slouží k přenosu a rozvodu elektrické energie z místa výroby do místa spotřeby. Elektrizační soustavu tvoří elektrické stanice, výrobní elektrické energie a elektrické sítě. Elektrizační soustavu rozdělujeme na přenosovou a distribuční soustavu. PS je tvořena sítěmi 400 a 220 kV a tvoří páteř elektrizační soustavy. Slouží k přenosu výkonů na velké vzdálenosti, zajišťuje propojení elektrizační soustavy se zahraničními elektrizačními soustavami a dále slouží pro vyvedení výkonu z velkých systémových elektráren. Distribuční soustava slouží k distribuci výkonu k odběratelům. Je tvořena sítěmi 110 kV a nižších napěťových úrovní. Přenáší výkon na kratší vzdálenosti a jsou do ní připojeny elektrárny nižších výkonů a v některých případech zajišťuje přeshraniční propojení [2]

Elektrické stanice tvoří uzly elektrizační soustavy, které jsou vzájemně propojeny. Podle účelu je dělíme na transformovny, rozvodny (někdy nazývané spínací stanice) a měnirny. Transformovny slouží ke změně napětí, rozvodny slouží k rozvádění energie téhož napětí (tvoří uzly vedení) a měnirny slouží ke změně kmitočtu např. pro napájení elektrické trakce.

Typická stanice PS se skládá z několika rozvodů různých napětí vvn a transformovny. Většina dnešních elektrických stanic PS je v režimu bezobslužného provozu.

Elektrické vedení zprostředkovává propojení mezi uzly elektrizační soustavy. Elektrické vedení je jeden ze základních prvků elektrizační soustavy a slouží pro přenos elektrické energie z jednoho, do druhého uzlu elektrické sítě. [3] [4]

2.2 Elektrická stanice Kočín

Elektrická stanice Kočín tvoří uzel PS, který se skládá ze dvou hlavních přípojníc a pomocné přípojnice. Elektrickou stanicí Kočín tvoří rozvodna Kočín 420 kV, která je v rozsahu 14 polí, dvou stanovišť transformátorů 400/110 kV osazených třífázovými jednotkami - T401 a T402 a je ve správě společnosti ČEPS, a. s.. Dále obsahuje stanoviště kompenzačních tlumivek 400 kV sestaveného ze tří jednofázových jednotek a jedné rezervní jednotky. Venkovní

rozvodna 123 kV s rozsahem 18 polí a vnitřní rozvodna 22 kV je spravována distribuční společností E.ON. [5] [6]

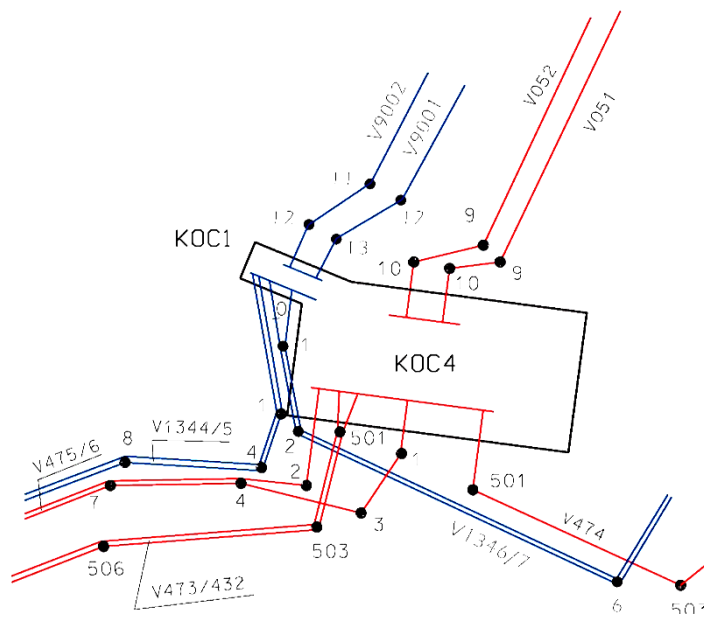


Obrázek 1 – Letecký snímek Elektrické stanice Kočín.

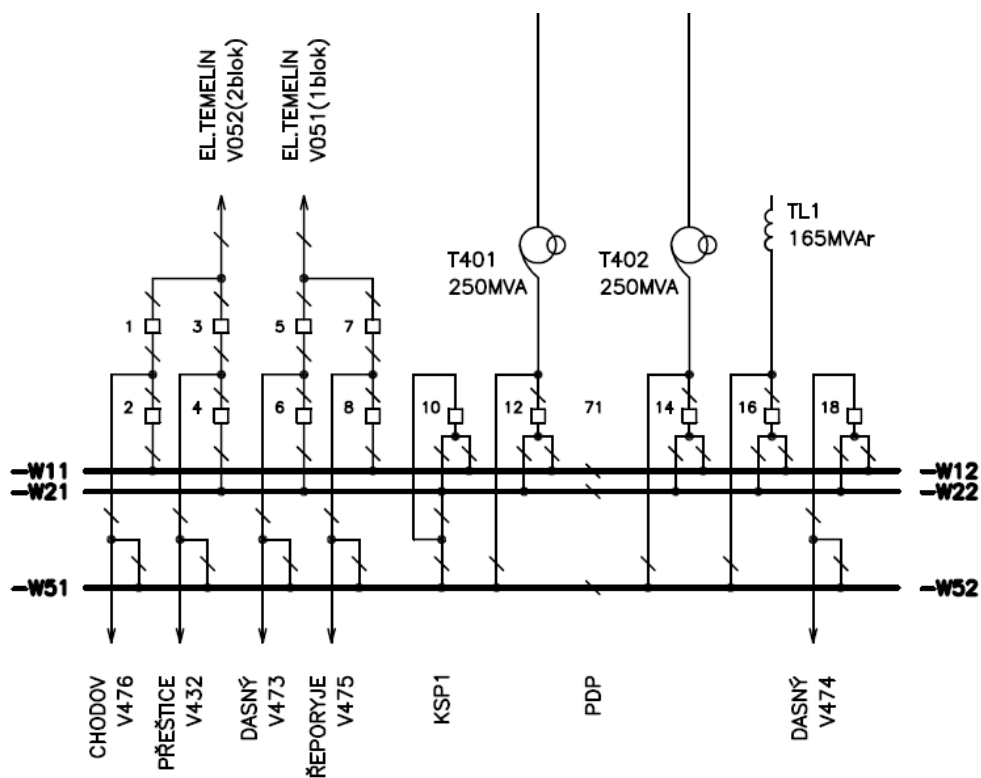
2.2.1 Rozvodna Kočín 420 kV

Rozvodna 420 kV je venkovního provedení a skládá se ze dvou hlavních přípojníc a pomocné přípojnice. Do rozvodny Kočín 420 kV je vyveden výkon JETE, vyvedení výkonu je realizováno pomocí zapojení 4/3 vypínače na odbočku z důvodu větší provozní spolehlivosti. Pole transformátorů, tlumivky a vedení V 474 do rozvodny Dasný jsou v klasickém zapojení, to znamená s jedním vypínačem na odbočku. Hlavní přípojnice slouží pro elektrické propojení jednotlivých vývodů, pomocná přípojnice slouží pro náhradní provoz polí vývodů. KSP slouží jako spínač hlavních přípojníc nebo spínač pro náhradní provoz polí, v takovém případě musí být provoz hlavních přípojníc pouze na jedné přípojnici. Hlavní přípojnice jsou rozděleny na dvě části tzv. podélným dělením přípojníc, v normální provozní situaci je podélné dělení ve stavu zapnuto. Přípojnice (někdy nazývána sběrnice) je základní prvek rozvodných zařízení a označují se tak vodiče, které mají za úkol rozvést přivedenou elektrickou energii do všech vývodových větví vycházejících z rozvodny. Přípojnice v rozvodnách jsou většinou v provedení lanových, či trubkových vodičů, výjimku tvoří zapouzdržené rozvodny. Jelikož se na přípojnících soustřeďuje veškerý přivedený výkon, dochází při vzniku zkratu na přípojnici k tomu, že přípojnice jsou vystaveny velkým zkratovým proudům o velkém zkratovém výkonu.

V rozvodně 420 kV Kočín je celkem 5 vývodových polí, 2 vývody blokového vedení JETE, pole transformátorů T401 a T402, pole tlumivky TL401 a pole kombinovaného spínače přípojníc. Kromě vývodových polí je rozvodně 420 kV pole měření, ve kterém jsou umístěny měřicí transformátory napětí přípojníc. [3] [5]



Obrázek 2 – Schéma zaústění stávajících vedení.



Obrázek 3 – Jednopolové schéma rozvodny Kočín 420 kV.

Tabulka 1 – Obsazení polí rozvodny:

pole č.	typ odbočky	označení
1,3	blokový vývod el. Temelín	V052
2	vývod Chodov	V476
4	vývod Přeštice	V432
5,7	blokový vývod el. Temelín	V051
6	vývod Dasný	V473
8	vývod Řeporyje	V475
10	kombinovaný spínač přípojníc	KSP1
12	transformátor 400/110 kV	T401
71	podélné dělení přípojníc	PDP
14	transformátor 400/110 kV	T402
16	tlumivka 400 kV	TL401
18	vývod Dasný	V474

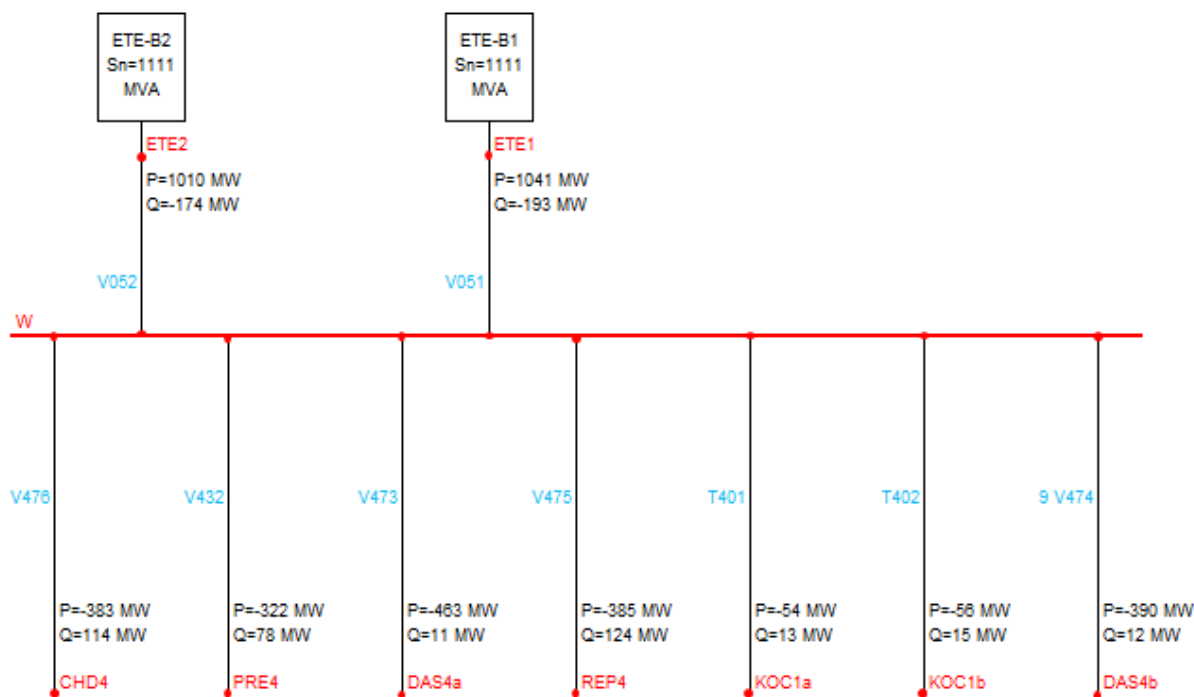
2.3 Vytvoření nového projektu rozvodny Kočín 420 kV

V prvním kroku je vytvořen zjednodušený model rozvodny Kočín 420 kV. Na základě tohoto zjednodušeného modelu je proveden v MODES výpočet třífázového zkratu a zároveň je provedeno porovnání výsledku s výpočtem teoretickým. Následně je zjednodušený model rozvodny Kočín 420 kV rozšířen.

Na zjednodušeném modelu tato kapitola popisuje postup vytvoření nového projektu v síťovém simulátoru MODES. Pro vytvoření nového projektu je použit výchozí projekt NEW. Tento projekt obsahuje základní soubory, které jsou nutné pro výpočet. Nový případ je vytvořen tak, že byl případ UST_STAV doplněn a rozšířen dle zjednodušeného modelu rozvodny Kočín 420 kV pomocí Editor Chodu. Základ celého modelu v MODES tvoří tzv. chod sítě. Vstupní soubory UST.DAT, VET.DAT a GEN.DAT poskytují parametry zatížení, větví, nasazení zdrojů a informace o konfiguraci sítě pro výpočet chodu sítě. Dalšími vstupními soubory jsou TYP_BLOK.CAT, který představuje vstupní parametry pro modely generátorů, buzení, turbíny a kotle a také soubor NESYM.DAT, ve kterém jsou zapsány nulové složky vedení. Vstupní parametry lze provést v režimu textového editoru, nebo pomocí dialogů a tabulek, které by mělo být dle autora pohodlnější a přesnější.

Pro výpočet třífázového zkratového proudu je model rozvodny Kočín 420 kV co nejvíce zjednodušen a je vytvořen zjednodušený model (*Obrázek 4*). Jak již bylo zmíněno (kapitola 2.2.1) rozvodna Kočín 420 kV má dvě přípojnice hlavní a jednu pomocnou, která je určena k náhradnímu provozu. V případě normálního provozního stavu jsou hlavní přípojnice spojeny přes KSP a lze je tedy uvažovat jako jeden uzel (označený písmenem W).

Na základě zjednodušeného modelu je také provedena příprava pro práci s MODES (sestavení schématu obvodu, značení uzlů, větví a bloků). Pro zjednodušený model jsou použity data z řídicího dispečerského systému TRISQ společnosti ČEPS, a. s., tak aby výsledky této práce co nejvíce odpovídaly skutečnému stavu. Použité hodnoty zobrazuje *Obrázek 4*. [1] [7]



Obrázek 4 – Schéma zjednodušeného modelu rozvodny Kočín 420 kV.

2.3.1 Uzly

Dle zjednodušeného modelu rozvodny jsou příslušné uzly vytvořeny pomocí Formuláře zadání parametrů pro uzel (Obrázek 5). Pomocí formuláře je zvolen typ uzlu a vyplněny požadované parametry pro daný uzel. Jako vztažné napětí je zvoleno jmenovité napětí $U_n = 400$ kV. Na základě zjednodušeného modelu rozvodny Kočín bylo vytvořeno celkem 10 uzlů. Ve schématu (Obrázek 4) jsou uzly označeny červeným textem.

2.3.1.1 Uzel odběrový PQ

Uzel odběrový je definován činným a jalovým výkonem. Jalové odběry uzlů jsou zadány se záporným znaménkem, protože do uzlu je jalová složka výkonu dodávána, nikoliv odebrána. Činný a jalový výkon se během výpočtu v MODES v PQ uzlech nemění, napětí je dopočteno na základě výkonových rovnic. V odběrovém uzlu je napětí U_{abs} dopočítáno na základě hodnot P_{odb} a Q_{odb} . Kromě uzlů ETE1 a ETE2 jsou všechny uzly modelovány jako uzly odběrové. [1]

Formulář zadání parametrů pro uzel

Identifikační číslo uzlu: 4
Číslo oblasti: 1
Vztažné napětí [kV]: 400

Identifikační jméno: CHD4

Typ uzlu:
☒ PQ
☐ PU
☐ Motor

Činný odběr [MW]: 383
Jalový odběr [MVar]: -114
Kompenzační výkon [MVar]: 0
Podíl motorů [%]:

OK Přidat větev Zruš

Obrázek 5 – Zadání parametrů pro odběrový uzel CHD4.

2.3.1.2 Uzel napájecí PU

Napájecí uzel je definován činnou dodávkou do uzlu P_{dod} a velikostí napětí uzlu U_{abs} . Velikost napětí uzlu U_{abs} je v průběhu výpočtu udržována pomocí dodávky jalového výkonu do uzlu v mezích Q_{min} a Q_{max} . V případě dosažení mezí Q_{min} a Q_{max} dojde ke změně charakteru uzlu z napájecího na odběrový a naopak. Model napětí U_{abs} , který je zadán před výpočtem, se udržuje změnou dodávky jalového výkonu. [1]

Obrázek 6 – Zadání parametrů pro napájecí uzel ETE1.

uziv. číslo	Jmeno uzlu	Cislo obl.	uv [kv]	absu [kv]	argu [stup]	Podb [MW]	Qodb [MVar]	Pdod [MW]	Qdod [MVar]	Qkomp	Qmin [MVar]	Qmax	uzad [kv]	Nk (-)
1	'ETE1'	1	400	412	0.00000	0.0	0.0	1041	-174	0.0	-9999	9999		
2	'ETE2'	1	400	412	0.00000	0.0	0.0	1010	-193	0.0	-9999	9999		
3	'w'	1	400	420	0.00000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.000	0
4	'CHD4'	1	400	420	0.00000	383	-114	0.0	0.0	0.0	0	0	0.000	0
5	'PRE4'	1	400	420	0.00000	322	-78	0.0	0.0	0.0	0	0	0.000	0
6	'DAS4a'	1	400	420	0.00000	463	-11	0.0	0.0	0.0	0	0	0.000	0
7	'REP4'	1	400	420	0.00000	385	-124	0.0	0.0	0.0	0	0	0.000	0
8	'KOC1a'	1	110	110	0.00000	54	-13	0.0	0.0	0.0	0	0	0.000	0
9	'KOC1b'	1	110	110	0.00000	54	-15	0.0	0.0	0.0	0	0	0.000	0
10	'DAS4b'	1	400	420	0.00000	390	-12	0.0	0.0	0.0	0	0	0.000	0

Obrázek 7 – Výpis souboru UST.DAT zobrazující zadané parametry pro všechny uzly.

2.3.2 Vedení

Větví rozumíme v MODES vedení, transformátor, případně spínač přípojníc a vypínačové pole polygonu. Větev je modelována π -článkem, kdy je v podélné části modelován odpor a induktivní reaktance vedení a v příčné větvi kapacita a svod. Modifikace větví je provedena pomocí Formuláře pro zadání parametrů pro větev (Obrázek 8). Pro každou větev je nutno určit počáteční a koncový uzel. *Tabulka 2* zobrazuje parametry pro jednotlivé větve.

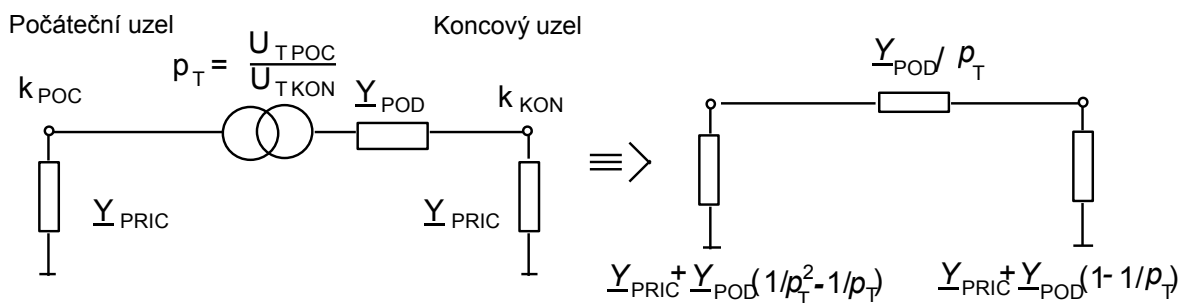
Obrázek 8 – Zadání parametrů větve.

Tabulka 2 - Parametry vedení:

číslo vedení	Z rozvodny	DO rozvodny	délka	R_1	X_1	B_1	R_0	X_0	B_0	I_{max}
			km	W	W	mS	W	W	mS	A
V051	Kočín	ETE I	2.94	0.06	0.82	12	0.36	1.91	7	1800
V052	Kočín	ETE II	3.04	0.06	0.85	12	0.37	1.98	8	1800
V432	Přeštice	Kočín	115.80	2.64	33.00	426	19.80	84.27	297	1740
V473	Kočín	Dasný	35.55	0.83	10.00	141	6.09	25.80	67	1740
V474	Kočín	Dasný	42.87	0.89	11.46	183	3.99	31.12	95	1740
V475	Kočín	Řeporyje	137.81	2.91	37.28	599	16.04	103.61	359	1740
V476	Kočín	Chodov	129.14	2.91	36.15	505	10.15	90.19	269	1740

2.3.3 Transformátory

Transformátor je v MODES modelován jako π -článek dle náhradního schématu (Obrázek 9). Zadáním činného odporu, indukčnosti, a kapacitní susceptance definujeme vstupní parametry pro transformátor a vytvoříme tím příčnou a podélnou impedanci transformátoru. Rozvodna Kočín 420 kV má celkem dva třífázové třívintové síťové autotransformátory se stupňovitou regulací napětí v zapojení $Y_N/y_n/d$ (T401, T402). Parametry transformátorů pod zatížením udává Tabulka 3.



Obrázek 9 – Náhradní schéma modelu větve pro transformátor (původní schéma vlevo, náhradní schéma v poměrných hodnotách vpravo). [7]

Pro zjednodušený model rozvodny Kočín 420 kV jsou transformátory modelovány jako dvouvinuťové bez možnosti regulace odboček při zatížení.

Tabulka 3 – Základní parametry transformátoru T401 a T402:

Veličina	Jednotka	T401	T402
S_N	MVA	250	
U_{N1T}	kV	400	
U_{N2T}	kV	121±8·1,5%	
u_{kr}	%	13,00	13,10
P_k	kW	630,00	656,00
P_0	kW	153,00	141,00
i_0	%	1,80	1,80

Pokud ve Formuláři pro zadání parametrů pro větev zvolíme typ větve Trafo a zatrhneme tlačítko Štítkové údaje, MODES ze zadaných štítkových údajů vypočítá parametry R_T , X_T a B_T . Dalším důležitým parametrem je poměrný převod p_T . Parametry R_T , X_T a p_T můžeme zadat i přímo.

Obrázek 10 – Zadání parametrů pro typ větve Trafo.

Norma ČSN EN 60909-0 [8] udává pro výpočet rezistenci transformátoru vztah:

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100\%} \times \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} \quad (2.1)$$

Dále platí:

$$I_{rT} = \frac{S_{rT}}{\sqrt{3} \times U_{rT}} \quad (2.2)$$

Pro zjednodušený výpočet rezistence transformátoru je vyjádřeno u_{Rr} . Po dosazení a úpravě:

$$u_{Rr} = 100 \times \frac{P_{krT}}{3 \frac{S_{rT}^2}{3U_{rT}^2}} \times \frac{S_{rT}^2}{U_{rT}^2} = 100 \times \frac{P_{krT} \times S_{rT} \times U_{rT}^2}{S_{rT}^2 \times U_{rT}^2} = 100 \times \frac{P_{krT}}{S_{rT}} \quad (2.3)$$

Vztah pro rezistenci transformátoru po zpětném dosazení:

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100\%} \times \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{100 \times P_{krT}}{100 \times S_{rT}} \times \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_K \times U_{N2}^2}{S_N^2} \quad (2.4)$$

Výpočet R_T pro T401:

$$R_{T401} = \frac{(630 \times 10^3) \times (400 \times 10^3)^2}{(250 \times 10^6)^2} = 1.613 \, \Omega$$

Výpočet R_T pro T402:

$$R_{T402} = \frac{(656 \times 10^3) \times (400 \times 10^3)^2}{(250 \times 10^6)^2} = 1.679 \, \Omega$$

Vztah pro výpočet impedance transformátoru dle ČSN EN 60909-0:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \times \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (2.5)$$

Výpočet Z_T pro T401:

$$Z_{T401} = \frac{13}{100} \times \frac{(400 \times 10^3)^2}{250 \times 10^6} = 83.2 \, \Omega$$

Výpočet Z_T pro T402:

$$Z_{T402} = \frac{13.1}{100} \times \frac{(400 \times 10^3)^2}{250 \times 10^6} = 83.84 \, \Omega$$

Vztah pro výpočet reaktance transformátoru dle ČSN EN 60909-0:

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (2.6)$$

Výpočet X_T pro T401:

$$X_{T401} = \sqrt{83.2^2 - 1.613^2} = 83.184 \, \Omega$$

Výpočet X_T pro T402:

$$X_{T402} = \sqrt{83.84^2 - 1.679^2} = 83.823 \, \Omega$$

Vztah pro výpočet převodu transformátoru:

$$p_T = \frac{\frac{U_{rTHV}}{U_{n1}}}{\frac{U_{rTLV}}{U_{n2}}} \quad (2.7)$$

Platí:

$$U_{n1S} = U_{rTHV} = 400 \, \text{kV}$$

Po dosazení platí:

$$\frac{U_{rTHV}}{U_{n1}} = 1$$

Sekundární napětí transformátorů $U_{n2} = 121 \, \text{kV}$ a napětí sítě na sekundární straně $U_{n2} = 110 \, \text{kV}$. Sekundární napětí transformátoru U_{rTLV} se mění dle pozice odbočky. Poměrný převod transformátoru p_T se mění v závislosti na po pozici odbočky, tzn. na hodnotě sekundárního napětí U_{rTLV} . Sítové transformátory T401 a T402 jsou stejného typu, stejného výkonu a pracují na stejných napěťových hladinách. Všechny možné převody pro T401 a T402 udává *Tabulka 4*.

Tabulka 4 – Převod T401 a T402:

Odbočka	U_{rTLV}	p_T	10	121 000	0.909
19	109 052	1.009	9	121 000	0.909
18	110 563	0.995	8	122 207	0.900
17	112 097	0.981	7	123 575	0.890
16	113 564	0.969	6	124 976	0.880
15	115 008	0.956	5	126 359	0.871
14	116 528	0.944	4	127 666	0.862
13	117 979	0.932	3	129 009	0.853
12	119 409	0.921	2	130 333	0.844
11	121 000	0.909	1	131 640	0.836

2.3.4 Elektrárenské bloky

V dalším kroku je nutno přiřadit bloky do uzlů. Pomocí volby Editovat –Přidat syn. stroj je přidán synchronní generátor, který přeměňuje mechanickou energii na elektrickou a představuje zdroj elektrické energie. Synchronní generátor je poslední částí bloku a je připojen přes blokový transformátor do PS. Vytvořený blok je nutné pojmenovat a taky vybrat uzel, do kterého bude generátor pracovat, dále je zde nutno zadat jmenovitý výkon a také horní a dolní mez regulačního rozsahu turbíny. Tyto parametry jsou uloženy do souboru GEN.DAT. Na obrázku (*Obrázek 11*) vidíme zatrhnutou možnost Zadej blokové trafo. Pokud je tato možnost zvolena, musíme následně zadat převod a reaktanci blokového

transformátoru. V MODES jsou celkem tři možnosti, jak můžeme zadat parametry pro blokový transformátor:

- zatrhnout možnost Zadej blokové trafo pomocí Formuláře zadání parametrů pro blok (Obrázek 11), kdy jsou následně parametry uloženy v GEN.DAT,
- zvolit blokový transformátor jako součást bloku v Editoru modelu bloků (Obrázek 12), parametry uloženy v souboru TYP_BLOK.CAT,
- nebo modelovat blokový transformátor jako větev, parametry uloženy v souboru VET.DAT. [1]

Obrázek 11 – Zadání parametrů pro synchronní generátor.

Zvolil jsem druhou variantu a vstupní parametry pro blokový transformátor jsem zadal pomocí Editoru modelu bloků (Obrázek 12).

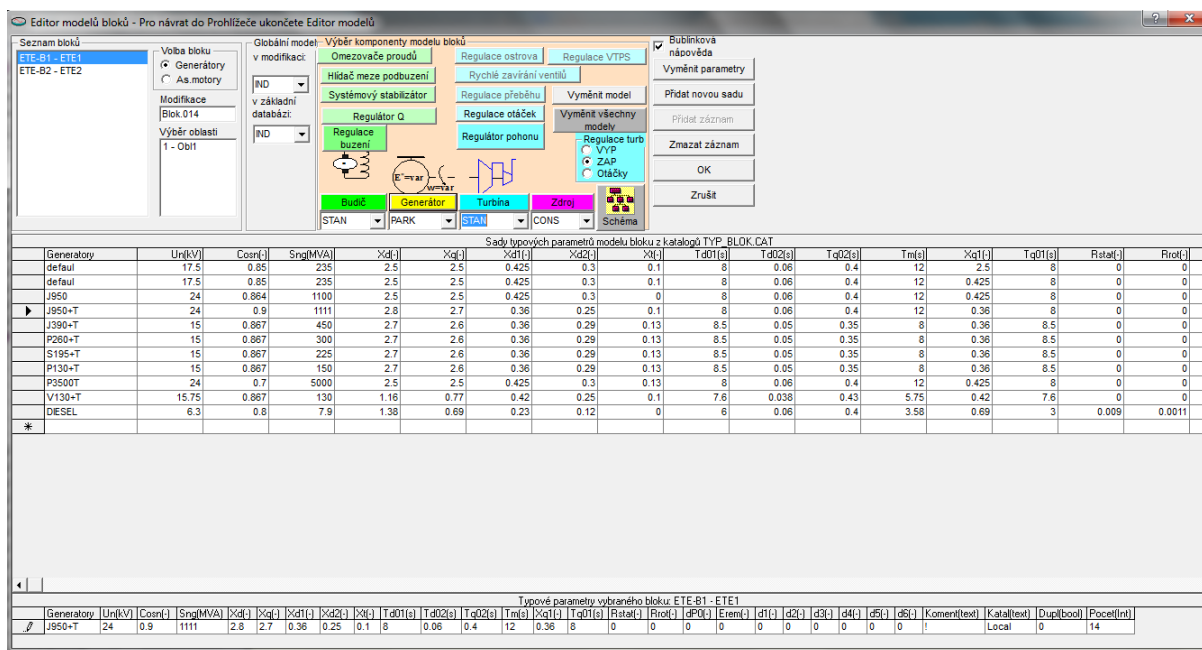
2.3.5 Přiřazení dynamických modelů elektrárenským blokům

V případě modelu synchronního generátoru je zadán pouze výkon a meze rozsahu turbíny, v MODES je ale také nutno zadat model buzení, turbíny a kotle. Tyto vstupní údaje jsou uloženy v souboru TYP_BLOK.CAT. Knihovna modelu bloků obsahuje celkem 11 předdefinovaných modelů bloků, ze kterých je možno některý vybrat, nebo vstupní parametry pro blok, editovat dle skutečných parametrů. *Tabulka 5* zobrazuje výpis zadaných parametrů pro blok JETE. Tento model je následně použit pro oba bloky, protože oba bloky v JETE jsou totožné.

Pro generátor, tedy pro blok ETE-B1 a ETE-B2 je zvolen model PARK (Parkův model generátoru), což znamená, že pro simulaci je využívána Parkova transformace, která využívá kompletní sadu rovnic synchronního stroje. Modely buzení a turbíny jsou zadány jako STAN (standartní zjednodušený systém). Model kotle je zadán jako CONS (model jednoduchý bez možnosti regulace). [1]

Tabulka 5 – Parametry pro blok ETE-B1 a ETE-B1:

U_n	$\cos \varphi$	S_n	X_d	X_q	X'_d	X''_d	X_t	T'_{d0}	T''_{d0}	T''_q	T_m	X'_q	T'_q
kV	(-)	MVA	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	s	s	s	s	(-)	s
24	0.9	1111	2.8	2.7	0.36	0.25	0.1	8	0.06	0.4	12	0.36	8



Obrázek 12 – Editor modelu bloků.

2.3.6 Parametry pro výpočet nesymetrických stavů

Soubor NESYM.DAT (Obrázek 13) obsahuje vstupní parametry pro souslednou a nulovou složku větví (vedení a transformátorů), které slouží k dynamické simulaci nesymetrických stavů v soustavě. V případě vedení jsou hodnoty pro souslednou a nulovou složku větví zadány na základě hodnot z *Tabulka 2*. V případě generátorů program MODES neumožňuje zadávat rozdílné rázové reaktance v podélné a příčné ose, takže generátory jsou ve zpětné složce nahrazeny stejně jako v sousledné hodnotou X_d .

Tabulky obsahují údaje o parametrech netovce a zpětné složky složky
 Nvst-pocet vetvi, Ngen-pocet generatoru, Nmot-pocet motoru, Nuzl-pocet uzlu, Nvz-pocet vzajemnych impedanci, N3T-pocet trojvin.traf

9, 2, 0, 0, 0, 0																				
Porad cislo	Jmeno uzlu	Uzel Pocat	Uzel Konec	R (ohm)	X (ohm)	B (mikros)	abs{up(-)/uk(-)}		arg{up(-)/uk(-)}		Zapojeni (0/1/-4/4)		GPoc (mikros)	BPoc (mikros)	GPoc (mikros)	BPoc (mikros)	Imax/Smx (A/MVA)	Faz.posuv (hod)	_Nvetx	
1	'v051'	1	3	0.36	1.91	7	1.000	0.00	1	0.000	0.000	0.000	0.000	1800						
2	'v052'	2	3	0.37	1.98	8	1.000	0.00	1	0.000	0.000	0.000	0.000	1800						
3	'v476'	3	4	19.8	84.27	297	1.000	0.00	1	0.000	0.000	0.000	0.000	1740						
4	'v432'	3	5	6.09	25.8	67	1.000	0.00	1	0.000	0.000	0.000	0.000	1740						
5	'v473'	3	6	3.99	31.12	95	1.000	0.00	1	0.000	0.000	0.000	0.000	1740						
6	'v475'	3	7	16.04	103.61	359	1.000	0.00	1	0.000	0.000	0.000	0.000	1740						
9	'v474'	3	10	10.15	90.19	269	1.000	0.00	1	0.000	0.000	0.000	0.000	1740						
7	'T401'	3	8	1.61	83.184	0.	1.000	0.00	1	0.000	0.000	0.000	0.000	400						
8	'T402'	3	9	1.68	83.823	0.	1.000	0.00	1	0.000	0.000	0.000	0.000	400						

porad. cislo	stav 1/0	nazev bloku	nazev uzlu	Pocet/Sn [Integ/MVA]		Ntmin [MW]	Ntmax [MW]	X0 [p.j.]	Pt	xt	Ngenx									
1	1	'ETE-B1'	'ETE1'	1250.0		0.0	1080	0.001	1	0.000	.000									
2	1	'ETE-B2'	'ETE2'	1250.0		0.0	1080	0.001	1	0.000	.000									

Porad cislo	stav (01)	Jmeno Motoru	Jmeno uzlu	Sn (MVA)	Kzat (-)	R0 (-)	X0 (-)	_Nmotx												

Uziv. cislo	Jmeno uzlu	G0/Gzat [-]	B0/Bzat [-]	G2/Gzat [-]	B2/Bzat [-]	_Nuzlx														

porad. cislo	nazev 1.vetve	nazev 2.vetve	Rm (ohm)	Xm (ohm)	_NVZX															

Por. cis.	Jmeno trafa	Uzel 1.	Uzel 2.	Uzel 3.	dP0 (MW)	i0 (%)	Kod zapojeni	(0/1/2)	Hod.uhel	1.	2.	3.	2.	3.	_N3TX					

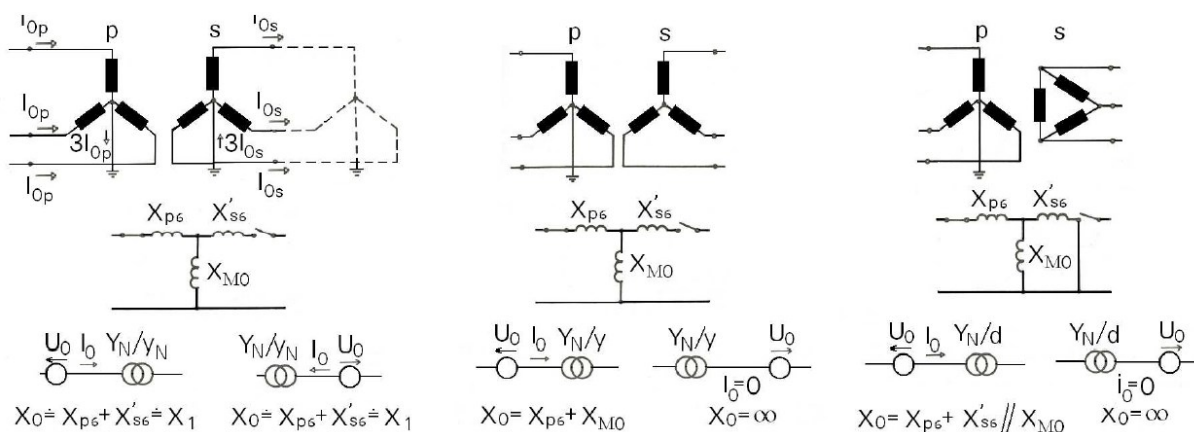
Obrázek 13 – Výpis parametrů ze souboru NESYM.DAT pro nulovou a zpětnou složku.

U transformátorů je nutné zadat správné zapojení. Jsou celkem čtyři typy zapojení:

- 0 – bez uzemnění uzlů (zapojení YY a Yd),
- 1 – oba uzly uzemněny (zapojení YzYz),
- -4 – vinutí u koncového uzlu uzemněno (zapojení dYz),
- 4 – vinutí u počátečního uzlu uzemněno (zapojení Yzd).

Transformátory T401 a T402 v rozvodně Kočín 420 kV jsou v zapojení $Y_N/y_n/d$, kdy jsou oba uzly uzemněny. Náhradní schémata a impedance transformátorů ve zpětné složkové soustavě jsou shodná s náhradními schématy a impedancemi sousledné složkové soustavy. Reaktance transformátorů v nulové složkové soustavě jsou určovány konstrukcí transformátorů a schématem spojení transformátoru. Reaktance transformátoru pro nulovou složkovou soustavu připojenou k jeho vinutí zapojenému do trojúhelníku nebo do hvězdy s izolovaným uzlem, je nekonečně velká. Proudů nulové složkové soustavy šířící se v síti nemohou do takto zapojeného vinutí transformátoru proniknout. Vinutím s přímo uzemněným uzlem mohou volně protékat proudy nulové složkové soustavy, na základě tohoto pravidla lze náhradní reaktanci transformátoru stanovit: [7]

$$X_0 \approx X_1$$

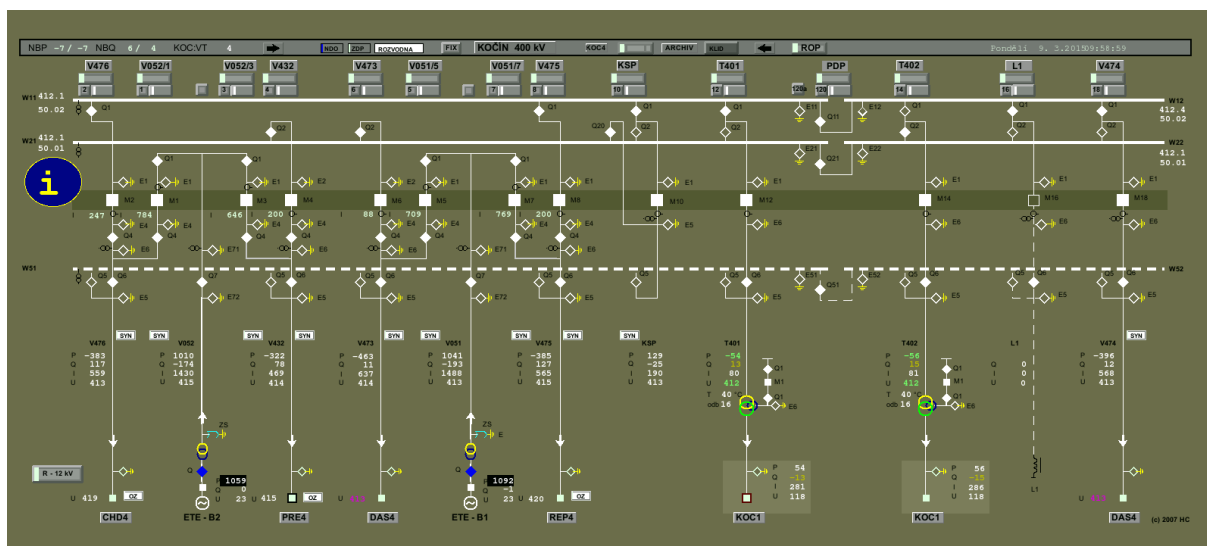


Obrázek 14 – Náhradní schémata transformátorů v nulové složkové soustavě. [7]

V případě zadávání vstupních parametrů je nutné zadat vše správně. Například nulová složka se uzavírá přes uzemněný střed hvězdy transformátoru při druhém vinutí zapojeném do trojúhelníku, který je pro nulovou složku neprůchodný. Pokud tedy takovou větev zadáme, způsobíme tím, že **MODES** není schopen spočítat inverzi síťové admitanční matice a určit tedy náhradní impedanci pro nulovou složku. Při zadávání také platí zásada, že pokud prvek nemá záznam v souboru **NESYM.DAT**, tvoří pro nulovou složku nekonečnou impedanci a nulová složka se jím neuzavírá. Pokud je tedy transformátor zapojen bez uzemnění uzlu (typ 0) není třeba zadávat jeho impedanci. [1]

2.4 Rozšíření zjednodušeného modelu

Zjednodušený model rozvodny Kočín 420 kV slouží k porovnání simulovaných hodnot s výpočtem dle ČSN [8] pro třífázový zkrat. Aby bylo možno určit nejhorší místo vzniku zkratu v uzlu na propojených přípojnicích, je nutné stávající zjednodušený model rozvodny rozšířit. V souvislosti se základním provozním stavem je zjednodušený model rozvodny Kočín 420 kV rozšířen. Uvažovaný základní provozní stav představuje hodnoty z řídicího dispečerského systému TRISQ ze dne 9.3.2015 09:58 (Obrázek 15).



Obrázek 15 – Uvažovaný základní provozní stav.

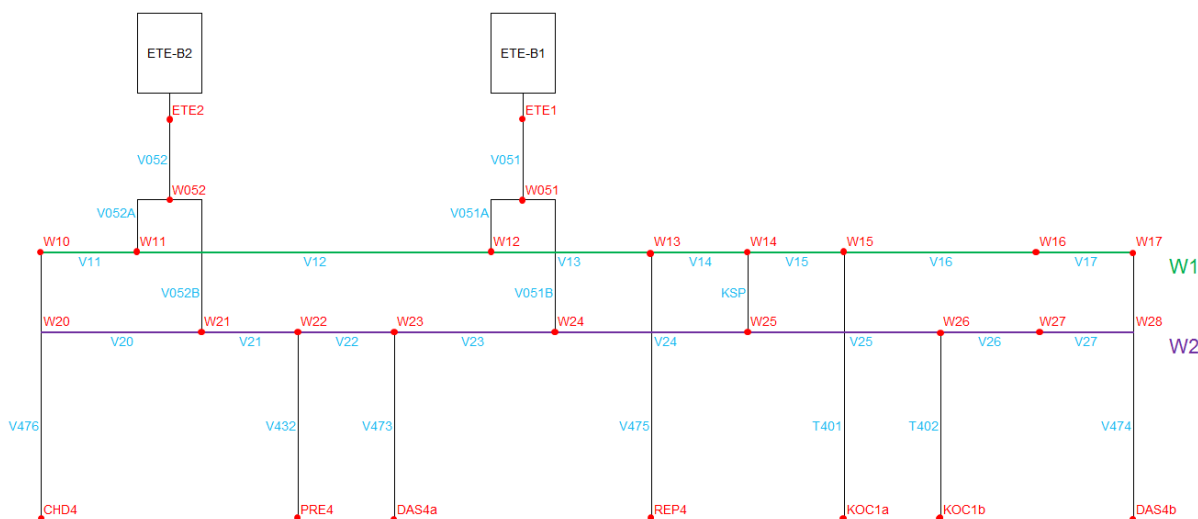
První hlavní přípojnice ve skutečnosti představují přípojnice W11 a W12, které jsou spojeny přes PDP. Druhou hlavní přípojnicí tvoří spojené přípojnice W12 a W22. Dále jsou hlavní přípojnice spojeny pomocí KSP. Další přípojnicí je přípojnice pomocná, kterou ve svém modelu však neuvažují, stejně jako tlumivku, protože oba prvky jsou v uvažovaném základním provozním stavu vypnuté.

Ve svém modelu jsem dvě hlavní přípojnice (W1 a W2) rozdělil na několik větví, proto aby bylo možno určit nejhorší místo vzniku zkratu. Parametry těchto větví jsem určil na základně skutečných parametrů pro KSP, které jsou $R_1 = 0.0047 \Omega$ a $X_1 = 0.0784 \Omega$. Jelikož však MODES umožňuje zadat hodnotu rezistence na setinu a pro reaktanci na tisícínou ohmu, byly hodnoty zaokrouhleny na $R_1 = 0.01 \Omega$ a $X_1 = 0.078 \Omega$. Hodnoty jsou pro všechny větve přípojníc modelovány stejně. Ve skutečnosti je délka jednotlivých úseků větví přípojníc odlišná, parametry těchto větví je však těžké určit a výsledný výpočet to ovlivní jen minimálně. Pro výpočet nesymetrických poruch jsou zadány hodnoty pro nulovou složku rezistence a reaktance $R_0 = 0.03 \Omega$ a $X_0 = 0.196 \Omega$.

Rozšířený model (Obrázek 16) obsahuje dvě hlavní přípojnice (W1 zelená a W2 fialová). Přípojnice W1 je ty modelována celkem 8 uzly (W10-W17) a 7 větvemi spojující uzly (V11-V17), složení přípojníc zobrazuje Tabulka 6.

Tabulka 6 – Složení přípojníc:

přípojnice	složená z větví							
W1	V11	V12	V13	V14	V15	V16	V17	-
W2	V20	V21	V22	V23	V24	V25	V26	V27



Obrázek 16 – Schéma rozšířeného modelu rozvodny Kočín 420 kV.

2.5 Ustálený chod rozvodny Kočín 420 kV

Při správném zadání parametrů a modifikaci vstupních datových souborů je možné spustit výpočet ustáleného chodu sítě. Výpočet ustáleného chodu určí toky činných a jalových výkonů a hodnoty fázorů napětí v dané soustavě. Vypočtené hodnoty jsou použity jako výchozí vstupní údaje pro řešení přechodných jevů, případně mohou být použity pro návrh dalšího rozvoje soustavy.

Pro výpočet ustáleného chodu v případě, že jsou zadány dodávky a odběry zdánlivými výkony, platí tedy pro i -tý uzel:

$$S_i = P_i + jQ_i = U_i \times I_i^* \quad (2.8)$$

V této definici je přiřazeno k činnému dodávanému výkonu kladné znaménko a činnému odebíranému výkonu záporné znaménko. Pro induktivní zatížení souhlasí znaménko jalového výkonu se znaménkem činného výkonu, pro kapacitní zatížení je opačné. Vztah pro výpočet proudu je určen z rovnice:

$$I_i = \frac{S_i}{U_i} = \frac{P_i - jQ_i}{U_i} = \sum_{j=1}^n Y_{ij} U_j \quad (2.9)$$

Výpočet neznámých napětí vede k řešení soustavy nelineárních kvadratických rovnic, kdy se pro řešení používají iterační metody. Konkrétně jsou to dvě konvenční numerické metody – tzv. Gauss Seidlova a Newton-Raphsonova metoda. [6] [7]

2.5.1 Zjednodušený model

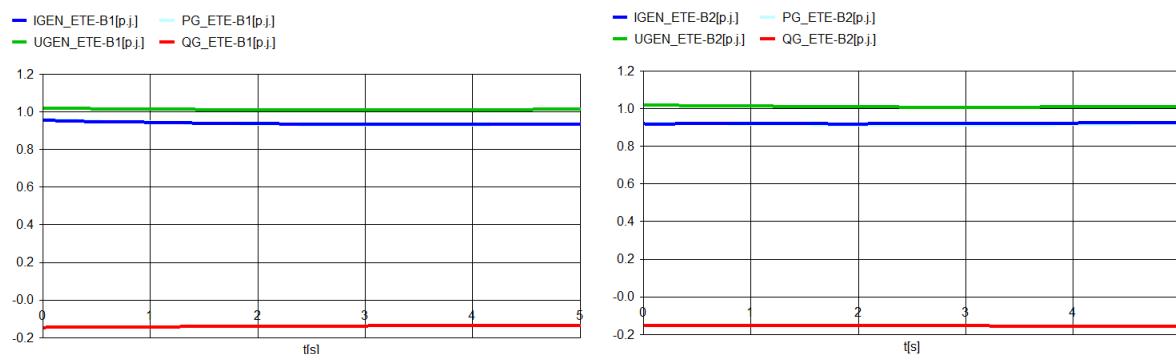
Pro výpočet ustáleného chodu je pro první blok, tedy pro napájecí uzel ETE1 zadán dodávaný netto činný výkon $P = 1041$ MW. Pro napájecí uzel ETE2 je hodnota netto činného výkonu $P = 1010$ MW. Hodnoty dodávaného výkonu jsou zadány na základě uvažovaného provozního stavu. Hodnoty rozsahu jalového výkonu pro udržení zadaného napětí U_{abs} jsou $Q_{min} = -240$ MVar a $Q_{max} = 505$ MVar. Pro referenční uzel ETE1 byla zadána hodnota napětí $U_{abs} = 412$ kV, která je držena právě rozsahem jalového výkonu. Jelikož se jedná

o referenční uzel, hodnota zadaného napětí se nezmění ani po výpočtu ustáleného chodu. Tendence JETE je držet reálnou dodávku jalového výkonu kolem $Q_{min} \cong -100$ MVar z důvodu udržení co nejvyššího účinníku $\cos \varphi$, který je důležitý z hlediska provozu PS.

Uživ. číslo	Jmeno uzlu	číslo obl.	Uv [kV]	absU [kV]	argU [stup]	Podb [MW]	Qodb [MVar]	Pdod [MW]	Qdod [MVar]	Qkomp	Qmin [MVar]	Qmax
1	'ETE1	1	400.0	412.0000000	0.0000000	0.0	0.0	1051.9	-240.0	0.0	-240.0	505.0
2	'ETE2	1	400.0	412.0666809	-0.0023317	0.0	0.0	1010.0	-240.0	0.0	-240.0	505.0
3	'W	1	400.0	412.4180298	-0.2966060	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	'CHD4	1	400.0	421.9985046	-5.0122790	383.0	-114.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	'PRE4	1	400.0	418.6512451	-3.9262269	322.0	-78.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	'DAS4a	1	400.0	411.8880005	-1.8648872	463.0	-11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	'REP4	1	400.0	423.9186401	-5.1757669	385.0	-124.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	'KOC1a	1	110.0	115.0599899	-20.528791	54.0	-13.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	'KOC1b	1	110.0	116.4864273	-20.449446	54.0	-15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	'DAS4b	1	400.0	412.1976929	-1.8114016	390.0	-12.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Obrázek 17 – Ustálený chod zjednodušeného modelu rozvodny Kočín 420 kV.

Po výpočtu ustáleného chodu jsou dopočítána napětí v jednotlivých uzlech. Napětí pro uzel REP4 je po výpočtu ustáleného chodu sítě $U_{abs} = 423.92$ kV. Řídicí systém TRISQ pro uzel REP4 zobrazuje hodnotu $U_{abs} = 420$ kV. Hodnoty napětí v uzlu se liší, což je způsobeno chybou měření, právě z tohoto důvodu se používá estimace. Cílem estimace je právě eliminovat vliv chyb v měřicích řetězcích, tudíž v tomto případě najít nejpravděpodobnější hodnotu napětí. Detailně estimaci řeší [7], kapitola 3.3, str. 155.



Obrázek 18 – Ustálený chod bloku ETE-B1 a ETE-B2.

2.5.2 Rozšířený model

V případě ustáleného stavu rozšířeného modelu (Obrázek 19) se vypočtené hodnoty liší pouze nepatrně od hodnot, které byly vypočteny pro ustálený chod zjednodušeného modelu rozvodny Kočín 420 kV.

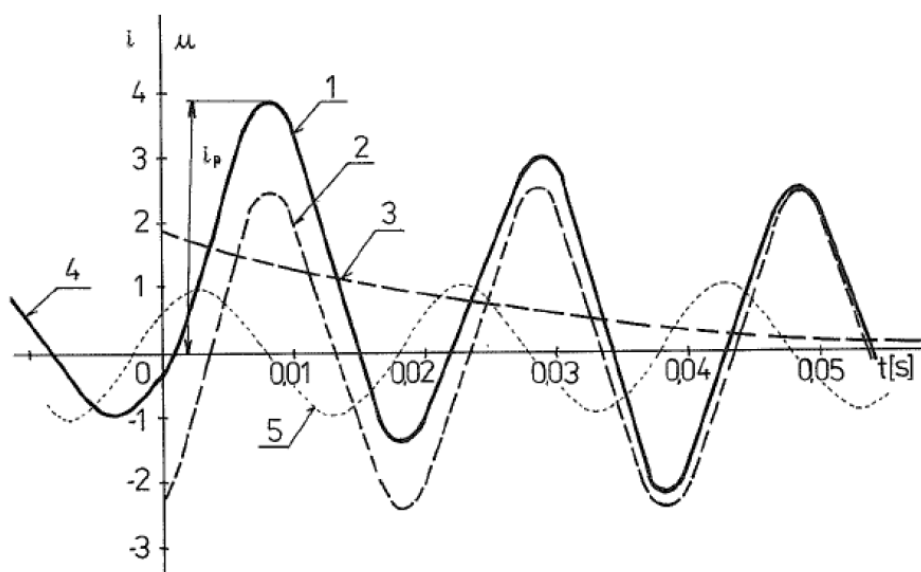
Uživ. číslo	Jmeno uzlu	Číslo obl.	Uv [kV]	absu [kV]	argu [stup]	Podb [MW]	Qodb [MVar]	Pdod [MW]	Qdod [MVar]	Qkomp	Qmin [MVar]	Qmax
1	'ETE1	1	400.0	412.0000000	0.0000000	0.0	0.0	1051.8	-240.0	0.0	-240.	505.
2	'ETE2	1	400.0	412.0805054	0.0034081	0.0	0.0	1010.0	-240.0	0.0	-240.	505.
3	'w10	1	400.0	412.4696655	-0.3157655	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.
4	'CHD4	1	400.0	422.0502625	-5.0302782	383.0	-114.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.
5	'PRE4	1	400.0	418.6769409	-3.9462693	322.0	-78.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.
6	'DAS4a	1	400.0	411.9028931	-1.8894428	463.0	-11.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.
7	'REP4	1	400.0	423.9552307	-5.2024274	385.0	-124.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.
8	'KOC1a	1	110.0	115.0654526	-20.570864	54.0	-13.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.
9	'KOC1b	1	110.0	116.4907303	-20.474455	54.0	-15.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.
10	'DAS4b	1	400.0	412.2088318	-1.8760540	390.0	-12.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.
11	'w051	1	400.0	412.4202576	-0.2965895	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.
12	'w052	1	400.0	412.4318237	-0.2908466	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.
13	'w11	1	400.0	412.4474182	-0.3050679	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.
14	'w12	1	400.0	412.4407654	-0.3085904	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.
15	'w13	1	400.0	412.4545288	-0.3241126	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.
16	'w14	1	400.0	412.4415283	-0.3287991	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.
17	'w15	1	400.0	412.4356995	-0.3405839	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.
18	'w16	1	400.0	412.4324036	-0.3509618	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.
19	'w17	1	400.0	412.4291382	-0.3613399	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.
20	'w20	1	400.0	412.4377441	-0.3039702	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.
21	'w21	1	400.0	412.4377441	-0.3039702	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.
22	'w22	1	400.0	412.4436646	-0.3170935	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.
23	'w23	1	400.0	412.4328918	-0.3212745	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.
24	'w24	1	400.0	412.4291687	-0.3131885	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.
25	'w25	1	400.0	412.4342957	-0.3217010	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.
26	'w26	1	400.0	412.4321594	-0.3231151	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.
27	'w27	1	400.0	412.4321594	-0.3231151	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.
28	'w28	1	400.0	412.4321594	-0.3231151	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.	0.

Obrázek 19 – Ustálený chod rozšířeného modelu rozvodny Kočín 420 kV.

3 Výpočet zkratů na přípojnicích

Zkrat je elektromagnetický přechodový děj, který je definován dle normy [8] jako „náhodné nebo úmyslné spojení dvou, nebo více vodivými částmi, vedoucí k tomu, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito vodivými částmi je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule“. [8]

V případě kompletního výpočtu je zkratový proud funkcí času v místě zkratu od jeho počátku do jeho konce a zkratové proudy odpovídají okamžité hodnotě napětí na počátku zkratu (Obrázek 20). Zejména pro účely dimenzování elektrických zařízení a nastavení ochran není ale nutné znát podrobný průběh zkratového proudu. Při zkratu se několikanásobně zmenší impedance obvodu, klesne napětí a obvodem protékají zkratové proudy, které jsou několikanásobně větší než proudy při normálním provozním stavu. Působení zkratových proudů je krátkodobého charakteru, ale vzhledem k jejich velikosti můžou být tepelné a mechanické účinky nebezpečné. S navyšováním spotřeby elektrické energie souvisí zvýšení výroby a rozrůstání elektrických sítí. V důsledku však zároveň dochází k zvýšení hodnot zkratových proudů. Nárůst hodnot zkratových proudů ovlivňuje zejména dimenzování elektroenergetických zařízení, kdy je třeba kontrolovat, aby hodnota zkratového proudu nepřekročila parametry zařízení (např. vypínačů). Z hlediska bezpečnosti provozu je tendence v rámci projektování a provozu používat zařízení s větší zkratovou odolností. [8] [9]



Obrázek 20 – Průběh zkratového proudu z ideálního napěťového zdroje. [7]

Zkratový proud má dvě složky, složku střídavou o jmenovité frekvenci $\omega = 2\pi f$, která je také nazývána souměrný zkratový proud a druhou složku tvoří stejnosměrný proud, zanikající s časovou konstantou T_a . Grafické znázornění (Obrázek 20) zobrazuje obě složky zkratového proudu, střídavou (2) a stejnosměrnou (3). Dále jsou zobrazeny průběhy napětí (5), celkového zkratového proudu (1) a průběh proudu před vznikem zkratu (4). Pro velikost zkratového proudu z obecného řešení plyne řešení partikulární:

$$i_k(t) = \frac{U_M}{Z} \left(e^{-\frac{t}{T_a}} - \cos \omega t \right) = \sqrt{2} I_k \left(e^{-\frac{t}{T_a}} - \cos \omega t \right) \quad (3.1)$$

Z partikulárního řešení lze odvodit základní charakteristiky časového průběhu zkratového proudu:

Počáteční rázový zkratový proud I_k'' je základní hodnotou zkratového proudu, což je efektivní hodnota střídavé (souměrné) složky zkratového proudu v okamžiku jeho vzniku a lze ho vypočítat ze vztahu:

$$I_k'' = \frac{c \times U_n}{\sqrt{3} \times Z_k} \quad (3.2)$$

Nárazový zkratový proud i_p je největší vrcholová hodnota zkratového proudu, která nastává při prvním maximu v čase $t = 0.01$ s po vzniku zkratu. Nárazový zkratový proud je výchozí hodnotou při kontrole elektrických zařízení na účinky zkratových proudů. Protože právě v okamžiku první amplitudy nabývá zkratový proud největší hodnoty a silové účinky jsou tak největší. V praktických zkratových výpočtech se proud i_p určuje z proudu I_k'' dle vztahu:

$$i_p = \kappa \times \sqrt{2} \times I_k'' \quad (3.3)$$

kde κ dle normy [8] představuje součinitel nárazového zkratového proudu.

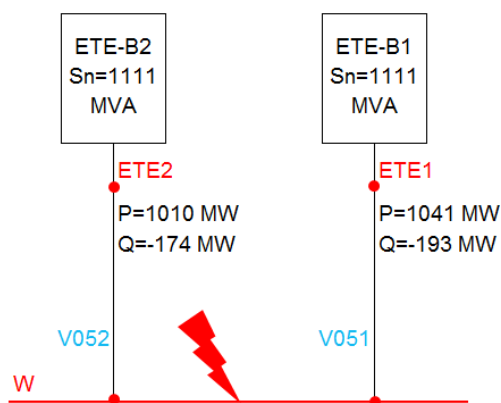
Ekvivalentní oteplovací proud I_{th} je definován jako efektivní hodnota fiktivního střídavého proudu, který má stejné tepelné účinky za dobu trvání skutečného zkratového proudu, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se mění. Ekvivalentní oteplovací proud se používá při kontrole tepelných účinků zkratového proudu a je vypočítán dle vztahu:

$$I_{th} = I_k'' \times \sqrt{m + n} = I_k'' \times k_e \quad (3.4)$$

kde m je časově závislý tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu a n je časově závislý tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu. [8]

3.1 Výpočet počátečního souměrného rázového zkratového proudu pro třífázový zkrat na přípojnicích dle ČSN EN 60909-0

Aby bylo možno porovnat hodnoty vypočtené pomocí MODES a potvrdit správnost zadaných vstupních dat pro případ zjednodušeného modelu rozvodny Kočín 420 kV, je v této kapitole vypočtena hodnota počátečního souměrného rázového zkratového proudu pro třífázový zkrat I_{k3}'' pro rozvodnu Kočín 420 kV dle normy ČSN EN 60909-0: Zkratové proudy v třífázových soustavách – Část 0: Výpočet proudů. Norma platí pro výpočet zkratových poměrů v třífázové elektrizační soustavě a jsou zde normalizovány všeobecné zásady pro určování parametrů jednotlivých prvků soustavy a pro výpočet zkratových proudů. Tato norma nahradila ČSN 33 3020 z roku 1992 a ČSN 33 3022 z roku 1996 a je to česká verze normy evropské EN 60909-0:2001. [8] [9]



Obrázek 21 – Místo vzniku zkratu.

3.1.1 Metoda ekvivalentního napětového zdroje

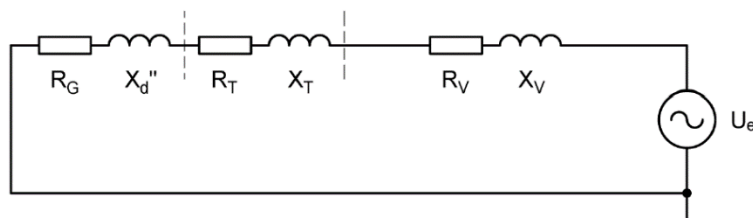
Jde o přesný výpočet, který vychází z metody superpozice a určí hodnotu počátečního rázového zkratového proudu I_k'' v místě zkratu a v jednotlivých větvích schématu. V místě zkratu je zaveden ekvivalentní napětový zdroj, který je jediným aktivním napětím soustavy. Všechny ostatní prvky soustavy jsou nahrazeny zkratovými impedancemi a místo vnitřních napětí zdrojů zkratového proudu jsou uvažovány zkraty. Hodnoty sousledných a zpětných impedancí se mohou navzájem lišit pouze v případě točivých strojů. V případě síťových napáječů, transformátorů, venkovních vedení, nebo pokud počítáme elektricky vzdálené zkraty je dovoleno uvažovat rovnost sousledné a zpětné zkratové impedance:

$$Z_{(1)} = Z_{(2)} \quad (3.5)$$

Nulová zkratová impedance $Z_{(0)}$ se určuje ze střídavého napětí uvažovaného mezi třemi paralelními vodiči a společným zpětným vedením:

$$Z_{(0)} = \frac{U_{(0)}}{I_{(0)}} \quad (3.6)$$

Pokud jsou počítány zkratové proudy pomocí ekvivalentního napětového zdroje v místě zkratu je potřeba impedance generátorů (G), síťových transformátorů (T) a elektrárenských bloků (S) vynásobit příslušnými impedance korekčním součinitelem K_G , K_T , K_S nebo K_{SO} . Detailně impedance korekční součinitele řeší norma IEC 60909-4.



Obrázek 22 – Náhradní schéma uvažovaného zkratového příspěvku jednoho bloku JETE. [8]

3.1.2 Zkratová impedance jednotlivých prvků

V rámci této podkapitoly je vypočtena zkratová impedance jednotlivých prvků dle normy [8], tak aby bylo možno vypočítat celkovou zkratovou impedanci pro jednotlivé bloky a určit tak počáteční souměrný rázový zkratový proud.

3.1.2.1 Generátor

Pro určení zkratové impedance generátoru, je nutno v první řadě určit rázovou reaktanci X_d'' :

$$X_d'' = x_d'' \times \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = 0.25 \times \frac{(24 \times 10^3)^2}{1111 \times 10^9} = 0.1296 \Omega \quad (3.7)$$

Dále je nutno vypočítat fiktivní rezistenci R_{Gf} pro generátory s $U_{rG}^2 > 1$ kV a $S_{rG} \geq 100$ MVA:

$$R_G \cong R_{Gf} = 0.05 \times X_d'' = 0.05 \times 0.1296 = 0.0065 \Omega \quad (3.8)$$

Součinitel 0.05 respektuje zanikání střídavé složky zkratového proudu v průběhu první půlperiody po výskytu zkratu. S vlivem různých teplot vinutí na R_{Gf} se neuvažuje.

Vztah pro výpočet rázové zkratové impedance pro synchronní generátor dle [8]:

$$\mathbb{Z}_G = R_G + jX_d'' = 0.0065 + j0.1296 \Omega \quad (3.9)$$

3.1.2.2 Blokový transformátor

Vztah pro výpočet sousledné zkratové impedance blokového transformátoru v komplexním tvaru dle [8]:

$$\mathbb{Z}_{TB} = R_T + jX_T \quad (3.10)$$

Výpočet impedance:

$$Z_{TB} = \frac{14}{100} \times \frac{(420 \times 10^3)^2}{1200 \times 10^6} = 20.58 \Omega$$

Rezistence transformátoru:

$$R_{TB} = \frac{(2.25 \times 10^6) \times (420 \times 10^3)^2}{(1200 \times 10^6)^2} = 0.276 \Omega$$

Reaktance:

$$X_{TB} = \sqrt{20.58^2 - 0.276^2} = 20.578 \Omega$$

Výsledná \mathbb{Z}_{TB} po dosazení:

$$\mathbb{Z}_{TB} = 0.276 + j20.578 \Omega$$

3.1.2.3 Elektrařenský blok

V případě výpočtu sousledné složky impedance elektrařenského bloku (SO) uvažují s blokovým transformátorem bez možnosti přepínání odbočky při zatížení. Impedanci celého

elektrárenského bloku k určení zkratového proudu na straně vyššího napětí blokového transformátoru je určeno dle vztahu:

$$\mathbb{Z}_{SO} = K_{SO}(p_T^2 \times \mathbb{Z}_G + \mathbb{Z}_{THV}) \quad (3.11)$$

Platí:

$$\mathbb{Z}_{THV} = \mathbb{Z}_T \quad (3.12)$$

S uvažováním korekčního součinitele K_{SO} :

$$K_{SO} = \frac{U_{nQ}}{U_{rG}(1 + r_G)} \times \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \times (1 \mp r_T) \times \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} \quad (3.13)$$

Platí, $(1 \mp r_T) = (1 \mp 0) = 1$, protože uvažujeme blokový transformátor bez možnosti změny odbočky při zatížení. Napětí ekvivalentního napětového zdroje je odvozeno ze jmenovitého (fázového) napětí sítě v místě zkratu vynásobením napětovým součinitelem c . Zavedení tohoto součinitele je v normě [8] zdůvodňováno kolísáním napětí v závislosti na čase a místě, přepínáním odboček transformátoru, zanedbáním zátěže, zanedbáním kapacitních reaktancí, chováním generátoru a motoru při přechodném ději. Napětový součinitel c_{max} v podstatě odpovídá dovolenému nejvyššímu napětí pro zařízení na dané napětové hladině. Dle [8], tabulky 1 na str. 22 je napětový součinitel pro výpočet maximálního zkratového proudu $c_{max} = 1.1$ pro $U_n > 35$ kV.

$$K_{SO} = \frac{420 \times 10^3}{24 \times 10^3 \times (1 + 0.05)} \times \frac{24 \times 10^3}{420 \times 10^3} \times 1 \times \frac{1.1}{1 + 0.25 + \sin 25.84^\circ} = 0.9447$$

Vztah pro jmenovitý převod blokového transformátoru:

$$p_t = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} = \frac{420 \times 10^3}{24 \times 10^3} = 17.5 \quad (3.14)$$

Po dosazení platí:

$$\begin{aligned} \mathbb{Z}_{SO} &= 0.9447 \times (17.5^2 \times (0.0065 + j0.1296) + (0.2756 + j20.578)) \\ \mathbb{Z}_{SO} &= 2.1561 + j58.0751 \end{aligned}$$

3.1.2.4 Vedení

Rezistence R_{V051} , R_{V052} a reaktance X_{V051} , X_{V052} jsou zadána dle *Tabulka 2*. Výpočet sousledné složky impedance venkovního vedení:

$$\mathbb{Z}_{V051} = R_{V051} + jX_{V051} = 0.06 + j0.82 \, \Omega \quad (3.15)$$

$$\mathbb{Z}_{V052} = R_{V052} + jX_{V052} = 0.06 + j0.85 \, \Omega \quad (3.16)$$

3.1.3 Celková zkratová impedance ETE-B1

$$\mathbb{Z}_{KETE-B1} = \mathbb{Z}_{SO} + \mathbb{Z}_{V051} \quad (3.17)$$

$$\mathbb{Z}_{KETE-B1} = (2.1561 + j58.0751) + (0.06 + j0.82) = 2.2161 + j58.8951 \, \Omega$$

$$Z_{KETE-B1} = \sqrt{R_K^2 + X_K^2} = \sqrt{2.2161^2 + 58.8951^2} = 58.9368 \, \Omega \quad (3.18)$$

3.1.4 Počáteční souměrný rázový zkratový proud pro ETE-B1

Vztah pro výpočet počátečního souměrného rázového zkratového proudu dle [8]:

$$I''_{k3ETE-B1} = \frac{1.1 \times 420 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 58.9368} = 4525.79 = 4.526 \, \text{kA}$$

3.1.5 Celková zkratová impedance ETE-B2

$$Z_{KETE-B2} = Z_{SO} + Z_{V052} \quad (3.19)$$

$$Z_{KETE-B2} = (2.1561 + j58,0751) + (0.06 + j0.85) = 2.2161 + j58.9251 \, \Omega$$

$$Z_{KETE-B2} = \sqrt{R_K^2 + X_K^2} = \sqrt{2.2161^2 + 58.9251^2} = 58.9668 \, \Omega \quad (3.20)$$

3.1.6 Počáteční souměrný rázový zkratový proud pro ETE-B2

$$I''_{k3ETE-B2} = \frac{1.1 \times 420 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 58.9668} = 4523.49 = 4.524 \, \text{kA}$$

3.1.7 Celkový počáteční souměrný rázový zkratový proud

Počáteční rázový zkratový proud je efektivní hodnota střídavého zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu. Jeho hodnotu můžeme zjednodušeně vypočítat součtem zkratových příspěvků zdrojů ETE-B1 a ETE-B2.

$$I''_{k3} = I''_{k3ETE-B1} + I''_{k3ETE-B2} \quad (3.21)$$

$$I''_{k3} = 4525.79 + 4523.49 = 9049.28 = 9.049 \, \text{kA}$$


Nebo metodou postupného zjednodušení, kdy celkovou zkratovou impedanci vypočteme jako:

$$Z_K = \frac{Z_{KETE-B1} \times Z_{KETE-B2}}{Z_{KETE-B1} + Z_{KETE-B2}} = \frac{58.9368 \times 58.9668}{58.9368 + 58.9668} = 29.4759 \, \Omega \quad (3.22)$$

$$I''_{k3} = \frac{1.1 \times 420 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 29.4759} = 9049.29 = 9.049 \, \text{kA}$$


3.2 Výpočet zkratů v uzlech na přípojnicích prostřednictvím MODES

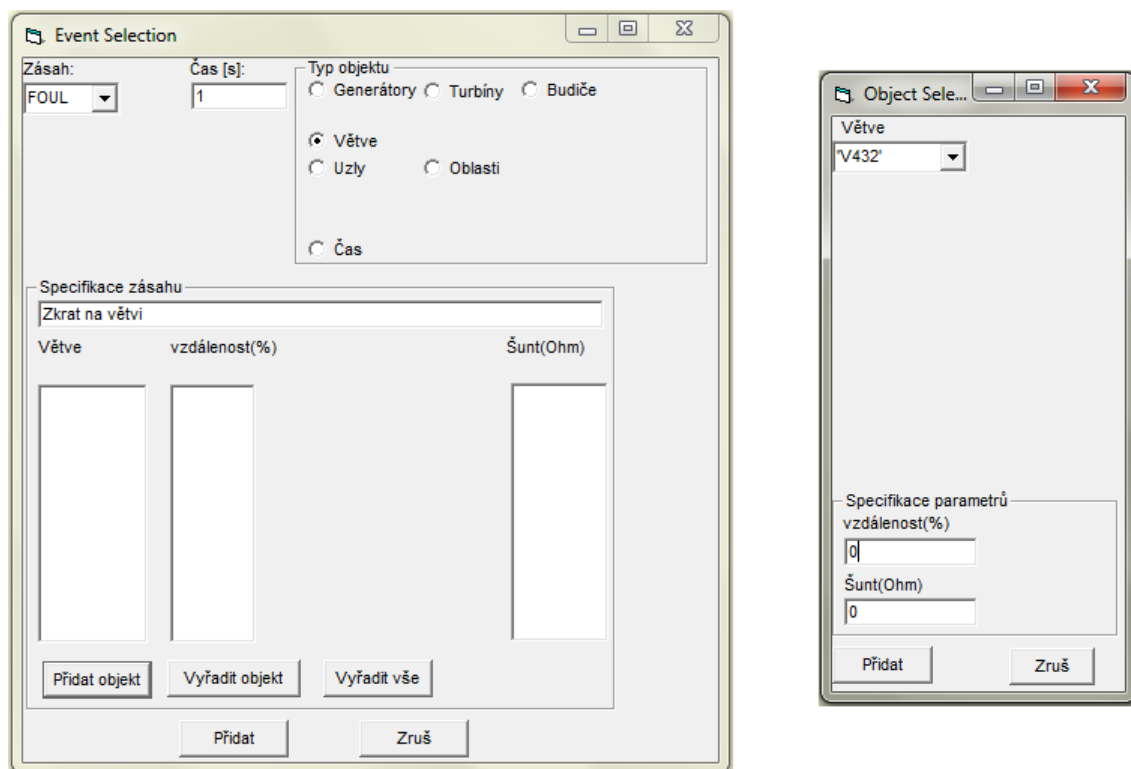
V předchozí kapitole (3.1) byl proveden ruční výpočet dle normy [8]. V případě rozšířeného modelu by však ruční výpočet zkratových proudů s použitím komplexních hodnot pro podélné zkratové impedance jednotlivých prvků byl složitější a zdlouhavý. Proto je pro výpočet zkratů na přípojnicích W1 a W2 využít program MODES. Norma [8] dokonce doporučuje v případě složitější sítě využít výpočetní programy.

V MODES je po výpočtu ustáleného stavu a provedení inicializace systému možno provést spuštění dynamické simulace. Výpočet dynamické simulace se provede kliknutím na ikonu  a nebo pomocí příkazu Spust/Simulace. Výsledek je zprostředkován tzv. grafikou, výsledný zobrazený časový průběh sledovaných proměnných je zobrazen až ve čtyřech grafech a zpracován v podobě souboru Uživatelské soubory.

V případě dynamické simulace MODES zanedbává příslušné momenty způsobené zpětnou a nulovou složkou proudů, ale umožňuje výpočet fázových hodnot napětí a proudů sítě a správně určit měřenou hodnotu napětí. Dále umožňuje vypočítat skutečnou (fázovou) hodnotu počátečního rázového proudu zkratu I_k'' (jelikož se jedná o zkrat na větvi, rozumí se proudem zkratu příspěvek proudů z počátečního a koncového uzlu) a maximální hodnoty nárazového, vypínacího a ekvivalentního oteplovacího proudu dle normy ČSN [8]. Vychází se z předpokladu, že v postižené fázi vznikne zkrat v okamžiku průchodu proudu nulou. [1]

3.2.1 Vytvoření scénáře

Samotný výpočet zkratu je zadán pomocí vytvoření scénáře pro daný zkrat. Scénář je zadán v dialogovém režimu v případě, že je zaškrtnutá volba Dialogy. Stisknutím tlačítka scénáře , nebo volbou v menu je spuštěn Scénář zásahů. Po volbě Přidat zásah se otevře Event Selection (*Obrázek 23*), z nabídky typů objektů pro tvorbu scénáře pro zkrat je zvolen typ objektu Větve. Z nabídky zásahů je vybrán příslušný zásah, který má být simulován, a následně je zadán čas okamžiku změny. V dalším kroku je potřeba určit objekt, na kterém má dojít k zásahu. Pomocí tlačítka Přidat objekt se otevře okno Object selection (*Obrázek 23*) ve kterém je objekt definován z nabídky název větve. Následně je provedena specifikace parametrů v podobě zadání vzdálenosti (v procentech délky dané větve) a velikosti reaktance.



Obrázek 23 – Event Selection (vlevo) a Object Selection (vpravo).

Pro zadání zkratu je možno také zadat druhý zásah v podobě odepnutí zkratu. Postup je obdobný s tím rozdílem, že z nabídky zásahů je vybrána možnost CLER, která definuje odpojení zkratu v zadaném časovém okamžiku.

Délku trvání zkratu můžeme snadno vypočítat rozdílem zadaných časových hodnot.

$$t = t_{CLER} - t_{FOUL} \quad (3.23)$$

3.2.2 Výsledky výpočtu

Pokud je ve scénáři zadán jeden z možných zkratů na vedení, v dalším kroku je ještě nutné zadat požadavek na vytvoření výstupního souboru s příponou (.SRC), který obsahuje výpis hodnot daného zkratu. Tento požadavek je zadán příkazem Modifikovat/Uživatelské soubory přidat soubor volbou Short circuit calculation na kartě Branches. Výstupní soubor je následně po provedení výpočtu dynamické simulace dostupný pomocí příkazu v menu Výsledky/Zkratové proudy.

```

1.vypis hodnot pri jednofazovem zkratu (S_L_G)
                                Zk1[ohm]      Zk2[ohm]      Zk0[ohm]      v11
(0.500E-01 j0.271E+02) (0.851E+01 j0.251E+02) (0.219E+00 j0.128E+01) (0.873E+01 j0.264E+02)
Ta[sec]: 1.9399567E-02
Data uzlu
Složka  Uzel      u[-]  argu[deg]  I[kA]  argI[deg]  Prispěvky vetvi
                                vetev  uzel      u[-]  argu[deg]  I[kA]  argI[deg]
Faze a w10      0.000    0.0    13.147  -91.6  a +---
1-Pos.          0.528    0.0    4.382  -91.6  b |---
2-Neg.          0.504   159.7    4.382  -91.6  c |---
0-Zer.          0.025   168.7    4.382  -91.6  g +
                                ---> GROUND  0.000    0.0    0.000    0.0  1-Pos.
                                v11      w11      0.529    0.0    4.366   -87.7  1-Pos.
                                V476     CHD4     0.540  -24.6    0.280   172.0  1-Pos.
*****
Casovy prubeh zkratoveho proudu
t[s]      Ik[kA]      ia[%]      mi[-]      ke[-]
4.9999952E-03  13.11246      77  0.9973698      1.600043
9.9999905E-03  13.07699      60  0.9946720      1.497582
1.4999986E-02  13.04267      46  0.9920613      1.417706

```

Obrázek 24 – Výpis hodnot při jednofázovém zkratu.

Výpis hodnot při jednofázovém zkratu (Obrázek 24) zobrazuje hlavičku s popisem druhu zkratu a na konci stejného řádku je název postižené větve. Jsou zde zobrazeny i hodnoty náhradních zkratových impedancí pro jednotlivé složkové soustavy. V levé části výpisu jsou na prvním řádku zobrazeny fázové i složkové hodnoty data uzlu, pro napětí a poruchový proud, který je součtem proudů přitékajících do místa poruchy. Pro trojfázový a jednofázový zkrat se jedná o fázi a, u ostatních o fázi b. U jednofázového zkratu jsou vypsány i hodnoty v zpětné a nulové složce. V pravé části, jsou hodnoty příspěvků větví v sousledné složce. Na první řádku je v případě připojení bloku do postiženého uzlu zobrazena hodnota elektromotorické síly E a sumární vstříkovaný proud. Pokud blok není do postiženého uzlu připojen je zde vypsáno slovo GROUND a proud, který odtéká do země. Na další řádku je výpis postižené větve, který obsahuje napětí ve vzdáleném uzlu a tok proudu ze vzdáleného uzlu a to fázové i sousledné hodnoty. V další části je zobrazen časový průběh zkratu. Je zde zobrazena hodnota rázového zkratového proudu I_k'' v daném čase, dále pak hodnota stejnosměrné složky v procentech a poslední hodnotou je součinitel k_e , který je použit pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu I_{th} (kapitola 3.3.3).

3.2.3 FOUL třífázový zkrat na větví

Zkoumán je třífázový zkrat, který je v MODES ve scénáři označen FOUL. Výsledkem je tedy počáteční souměrný rázový zkratový proud pro třífázový zkrat značený I_{k3}'' .

3.2.3.1 Zjednodušený model

Aby bylo možno porovnat hodnoty s výpočtem dle normy [8], je v případě třífázového zkratu vypočítána hodnota počátečního souměrného rázového zkratového proudu I''_{k3} i v rámci zjednodušeného modelu na přípojnici. Zkrat je simulován v uzlu W, konkrétně na větvi V432 ve vzdálenosti 0 %. Na základě výpisu hodnot (Obrázek 25) je hodnota počátečního souměrného rázového zkratového proudu $I''_{k3} = 9.022$ kA. Zkratový příspěvek z blokového vedení V051, což je hodnota zkratového příspěvku prvního výrobního bloku JETE, představuje hodnotu $I''_{k3} = 4.523$ kA. Druhý blok, tudíž příspěvek z blokového vedení V052 má hodnotu $I''_{k3} = 4.500$ kA. Zkratové příspěvky nejsou totožné protože ETE1 je zvolen jako bilanční uzel, což se promítne do výchozího stavu obou bloků. Proto mají oba generátory na vstupu různá napětí, z čehož plynou rozdíly ve zkratových příspěvcích. Dalším faktorem, který nepatrně ovlivňuje velikost zkratových příspěvků, jsou impedance blokových vedení.

```
1.vypis hodnot pri trifazovem zkratu (3_PH.)
                                v432
                                Zk1[ohm] Zk2[ohm] Zk0[ohm] Zd[ohm]
(0.335E-01 j0.269E+02) (0.000E+00 j0.160E+12) (0.000E+00 j0.160E+12) (0.000E+00 j0.160E-03)
Ta[sec]: 2.555804
Data uzlu
slozka uzel u[-] argu[deg] I[kA] argI[deg] Prispvky vetvi
                                vevet uzel u[-] argu[deg] I[kA] argI[deg]
Faze a w 0.000 0.0 9.022 -91.5 a +---
1-Pos. 0.000 0.0 9.022 -91.5 b +---
2-Neg. c +---
0-Nul.

----> GROUND 0.000 0.0 0.000 0.0 1-Pos.
V432 PRE4 0.000 0.0 0.000 -171.5 1-Pos.
V051 ETE1 0.016 -5.4 4.523 -91.2 1-Pos.
V052 ETE2 0.017 -5.7 4.500 -91.7 1-Pos.
V476 CHD4 0.000 -6.2 0.000 -169.6 1-Pos.
V473 DAS4a 0.000 -3.0 0.000 178.3 1-Pos.
V475 REP4 0.000 -6.3 0.000 -168.5 1-Pos.
V474 DAS4b 0.000 -3.0 0.000 178.8 1-Pos.
T401 KOC1a 0.000 -21.7 0.000 171.8 1-Pos.
T402 KOC1b 0.000 -21.6 0.000 173.9 1-Pos.
```

Obrázek 25 – Výpis hodnot při třífázovém zkratu na přípojnici W v rámci zjednodušeného modelu.

3.2.3.2 Rozšířený model

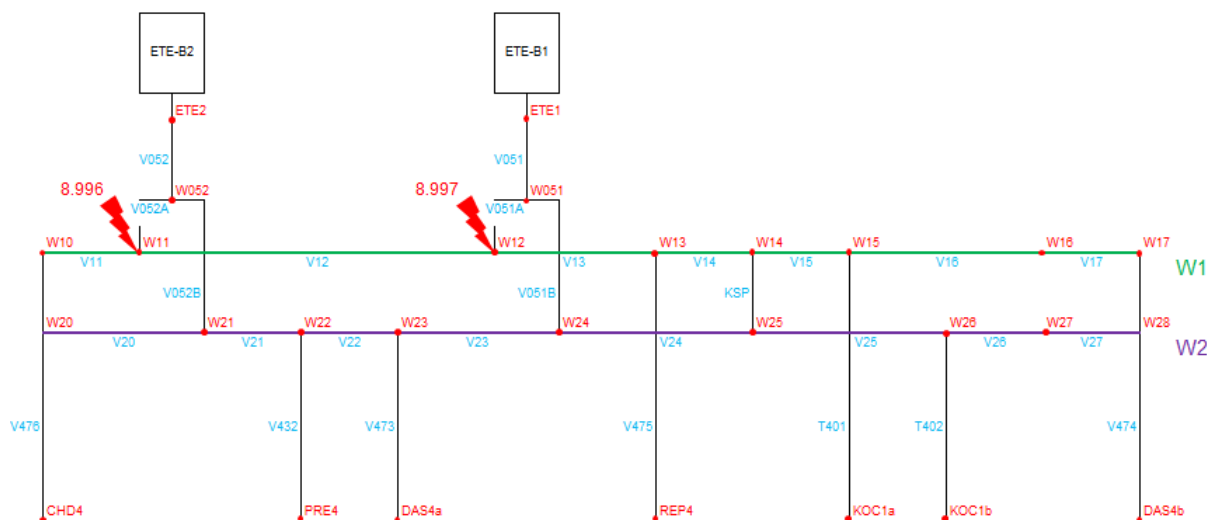
Tabulka 7 zobrazuje výpočet třífázového zkratu na přípojnících W1 a W2, které jsou v rámci rozšířeného modelu rozděleny na několik větví. Je uveden uzel, ve kterém je zkrat počítán a je zde zobrazena i větev na které je zkrat simulován, protože MODES neumožňuje simulaci zkratů v uzlu. Zkrat je simulován na uvedených větvích ve vzdálenosti 0 %. Výjimku tvoří větve, které jsou označeny symbolem *. Zde je zkrat simulován na dané větvi ve vzdálenosti 100 %.

Tabulka 7 – Třífázový zkrat na přípojnících W1 a W2

uzel	větev	I''_{k3}	I_{th}
W10	V11	8.963	15.494
W11	V12	8.996	15.554
W12	V13	8.997	15.556
W13	V14	8.982	15.528
W14	V15	8.976	15.517
W15	V16	8.950	15.469
W16	V17	8.932	15.436
W17	V17*	8.906	15.388

W20	V20	8.971	15.508
W21	V21	8.989	15.541
W22	V22	8.983	15.530
W23	V23	8.984	15.532
W24	V24	8.993	15.548
W25	V25	8.980	15.524
W26	V26	8.954	15.476
W27	V27	8.928	15.428
W28	V27*	8.902	15.381

Hodnota třífázového zkratového proudu se pohybuje v rozmezí $I''_{k3} = 8.902 - 8.997$ kA. Hodnoty zkratového proudu pro určité úseky přípojníc se liší pouze z důvodu vzdálenosti zkratu. Hodnoty zkratového proudu klesají s rostoucí vzdáleností místa zkratu od napájecích uzlů. Čím blíže je tedy zkrat k napájecímu uzlu, tím větší je zkratový příspěvek napájecího uzlu. Největší hodnoty představují zkraty simulované v uzlu W11 a W12 a to právě proto, že jde o uzly nejbližší k napájecím uzlům (Obrázek 26).



Obrázek 26 – Hodnoty zkratových proudů pro uzel W11 a W12 v blízkosti napájecích uzlů.

3.2.3.3 Porovnání

Tabulka 8 zobrazuje hodnoty, které jsou vypočteny pro třífázový zkrat na přípojnici. Odchylka vypočteného zkratového proudu pro zjednodušený model při porovnání s vypočtenou hodnotou dle ČSN je 0.3 %. V případě rozšířeného modelu je pro porovnání použita simulace zkratu na přípojnici W1, konkrétně v uzlu W14, kdy je zadán zkrat na větvi KSP ve vzdálenosti 0 %. Odchylka vypočteného zkratového proudu je 0.8 %. Odchylky jsou do 1 %, na základě tohoto porovnání lze tedy potvrdit správnost vytvořených modelů v síťovém simulátoru MODES.

Tabulka 8- Porovnání s výpočtem dle ČSN EN 60909-0:

ČSN	MODES			
	zjednodušený model		rozšířený model	
	I''_{k3}	odchylka	I''_{k3}	odchylka
kA	kA	%	kA	%
9.049	9.022	0.299	8.976	0.813

3.2.4 Nesymetrické poruchy

V trojfázové síti může dojít kromě symetrických třífázových zkratů i k poruchám nesymetrickým. Nesymetrickou poruchou rozumíme zkrat, přerušení fáze, nebo jejich kombinaci. Typy nesymetrických zkratů jsou zkrat jednofázový ve scénáři označen FSLG, dvoufázový F_LL a dvoufázový zemní FDLG.

V případě nesymetrických poruch MODES automaticky spočítá velikost poruchové impedance. Tuto impedanci připojí v případě zkratů mezi místo poruchy a zem (pro zkraty),

nebo mezi místa přerušení v případě rozpojení fáze. Vzorce pro výpočet velikosti poruchové impedance zobrazuje *Tabulka 9*.

Tabulka 9 – Výpočet poruchové impedance:

Typ poruchy	Zkratý			Přerušení	
	jednofázový	dvoufázový	dvoufázový zemní	jedné fáze	dvou fází
Z_{Δ}	$Z_{C2}+Z_{C0}$	Z_{C2}	$(Z_{C2}Z_{C0})/(Z_{C2}+Z_{C0})$	$(\zeta_{C2}\zeta_{C0})/(\zeta_{C2}+\zeta_{C0})$	$\zeta_{C2}+\zeta_{C0}$

Pomocí MODES jsou spočítány hodnoty pro nesymetrické poruchy na přípojnících W1 a W2, konkrétně pro jednofázový zkrat na větvi FSLG, dvoufázový zkrat na větvi F_LL a dvoufázový zemní zkrat na větvi FDLG. Vypočtené hodnoty počátečního souměrného rázového zkratového proudu zobrazuje *Tabulka 10*. Příslušný zkrat je simulován na uvedených větvích ve vzdálenosti 0 %. Výjimku tvoří větve, které jsou označeny symbolem *. Zde je zkrat simulován na dané větvi ve vzdálenosti 100 %.

Tabulka 10 – Nesymetrické poruchy na přípojnících W1 a W2:

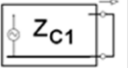

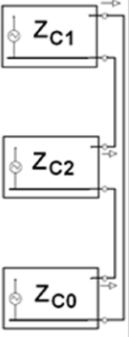
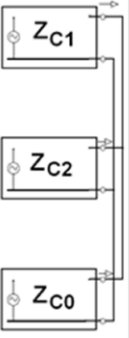
uzel	větev	FSLG		F_LL		FDLG	
		I''_{k1}	I_{th}	I''_{k2}	I_{th}	I''_{k2G}	I_{th}
W10	V11	13.147	21.036	7.774	12.439	7.774	12.439
W11	V12	13.233	21.173	7.797	12.476	7.797	12.476
W12	V13	13.200	21.120	7.799	12.479	7.799	12.479
W13	V14	13.145	21.031	7.785	12.456	7.785	12.456
W14	V15	13.122	20.994	7.780	12.447	7.780	12.447
W15	V16	13.039	20.860	7.757	12.410	7.757	12.410
W16	V17	12.956	20.727	7.735	12.375	7.735	12.375
W17	V17*	12.874	20.596	7.713	12.339	7.713	12.339
W20	V20	13.104	20.969	7.769	12.433	7.769	12.433
W21	V21	13.188	21.102	7.791	12.467	7.791	12.467
W22	V22	13.158	21.053	7.786	12.458	7.786	12.458
W23	V23	13.151	21.041	7.788	12.461	7.788	12.461
W24	V24	13.167	21.067	7.794	12.471	7.794	12.471
W25	V25	13.129	21.006	7.783	12.453	7.783	12.453
W26	V26	13.045	20.873	7.761	12.418	7.761	12.418
W27	V27	12.963	20.743	7.738	12.382	7.738	12.382
W28	V27*	12.881	20.613	7.716	12.348	7.716	12.348

Hodnota jednofázového zkratového proudu se pohybuje v rozmezí $I''_{k1} = 12.874 - 13.223$ kA pro jednofázový zkrat a $I''_{k2} = 7.713 - 7.799$ kA pro dvoufázový zkrat a dvoufázový zemní zkrat. Hodnoty zkratového proudu I''_k se pro určité úseky přípojníc liší z důvodu vzdálenosti zkratu, stejně jako v případě zkratu třífázového. Při porovnání hodnoty jednofázového zkratového proudu s hodnotou při zkratu třífázovém pro případ poruchy na přípojnících v rozvodně Kočín 420 kV platí:

$$I''_{k1} > I''_{k3} \quad (3.24)$$

Hodnoty pro dvoufázový zkrat I''_{k2} a dvoufázový zemní zkrat I''_{k2G} jsou stejné, protože v případě simulace dvoufázového zemního zkratu se neuzavírá nulová složka impedance. Náhradní schéma je pro dvoufázový zkrat a dvoufázový zemní zkrat stejné a pro složky zkratového proudu platí:

$$I_2 = -I_1 \quad (3.25)$$

Druh zkratu	Trojfázový	Dvoufázový	Jednofázový	Dvoufázový zemní
Z_{Δ}	0	Z_{C2}	$Z_{C2} + Z_{C0}$	$Z_{C2} // Z_{C0}$
Složky proudu	I_1	$I_2 = -I_1$	$I_1 = I_2 = I_0$	$I_1 = -(I_2 + I_0)$
Náhradní schéma				

Obrázek 27 – Přehled druhů zkratů.

3.3 Určení nejhoršího místa vzniku zkratu v uzlu na propojených přípojnících

Při výpočtu parametrů zkratového proudu pro dané místo zkratu je cílem především určit hodnotu počátečního souměrného rázového zkratového proudu I''_k v daném místě zkratu. Důležité je ale také identifikovat zkratové příspěvky, ze kterých je hodnota počátečního souměrného rázového zkratového proudu I''_k složena. Při respektování místa zkratu, topologie rozvodny a uspořádání elektrické sítě je vhodné především určit zkratové příspěvky přitékající do místa zkratu. V této diplomové práci však uvažuji pouze místo zkratu a zkratové příspěvky napájecích uzlů (bloků ETE-B1 a ETE-B2). Modelována je pouze rozvodna Kočín 420 kV a především z rozsahových důvodů není modelován ani uvažován zbytek PS. Odběrové uzly představují odběr činného a jalového výkonu, ale v případě symetrického zkratu vedení připojené do odběrových uzlů nedodávají žádné zkratové příspěvky. Pro určení nejhoršího místa vzniku zkratu je také významným parametrem ekvivalentní oteplovací proud I_{ke} . Ekvivalentní oteplovací proud je především používán při kontrole tepelných účinků zkratového proudu.

3.3.1 Zkratové příspěvky

Pro třífázové a jednofázové zkraty v příslušných uzlech byla provedena analýza zkratových příspěvků. Na základě hodnot, které zobrazuje *Tabulka 11*, jsou vybrána čtyři místa vzniku zkratu, která mají nejvyšší zkratový příspěvek přitékající do místa zkratu. Vzhledem k velikosti zkratových příspěvků, mohou být tepelné a mechanické účinky zkratových proudů pro danou část přípojnice nebezpečné.

Tabulka 11 – Zkratové příspěvky pro případ třífázového zkratu v daném uzlu:

FOUL v uzlu	I''_{k3}	zkratový příspěvek přitékající do místa zkratu					
		z větve	proud	z větve	proud	z větve	proud
W10	8.963	V11	8.963	V476	0	-	-
W11	8.996	V052A	4.903	V12	4.093	V11	0
W12	8.997	V051A	4.300	V12	3.674	V13	1.023
W13	8.982	V13	6.327	V14	2.654	V475	0
W14	8.976	V14	4.692	KSP	4.284	V15	0
W15	8.950	V15	8.950	T401	0	V16	0
W16	8.932	V16	8.924	V17	0	-	-
W17	8.906	V17	8.906	V474	0	-	-
W20	8.971	V20	8.971	-	-	-	-
W21	8.989	V052B	6.127	V21	2.862	V20	0
W22	8.983	V21	4.897	V22	4.086	V432	0
W23	8.984	V23	5.312	V22	3.672	V473	0
W24	8.993	V051B	5.114	V23	2.448	V24	1.430
W25	8.980	V24	5.919	KSP	3.061	V25	0
W26	8.954	V25	8.954	T402	0	V26	0
W27	8.928	V26	8.928	V27	0	-	-
W28	8.902	V27	8.902	-	-	-	-

Ve všech čtyřech případech jde o zkratové příspěvky s hodnotou větší než $I''_{k3} = 8.9$ kA. Hodnoty jednotlivých zkratových příspěvků jsou shodné se zkratovým proudem v daném uzlu. Hodnoty jsou stejné z toho důvodu, že zkrat je simulován v uzlu, do kterého zkratový příspěvek přitéká pouze z jednoho směru a zkratové příspěvky byly sečteny² ve vzdáleném uzlu (Obrázek 29). Na základě výsledků (Tabulka 11) z výstupního souboru (.SRC) nelze určit rozložení zkratových proudů. Pro zkrat v uzlu W10 je hodnota zkratového příspěvku z větve V11 $I''_{k3} = 8.963$ kA a je totožná s výsledným zkratovým proudem v uzlu W10. Aby bylo možné určit rozložení zkratových proudů ve vzdáleném uzlu W11, ze kterého teče zkratový příspěvek po vedení V11 do místa zkratu, byla provedena detailní analýza rozložení proudů při zkratu v daném uzlu. Detailní analýzou se zabývá další podkapitola (3.3.2).

² Dle prvního Kirchhoffova zákona: Součet proudů vstupujících do uzlu se rovná součtu proudů z uzlu vystupujících.

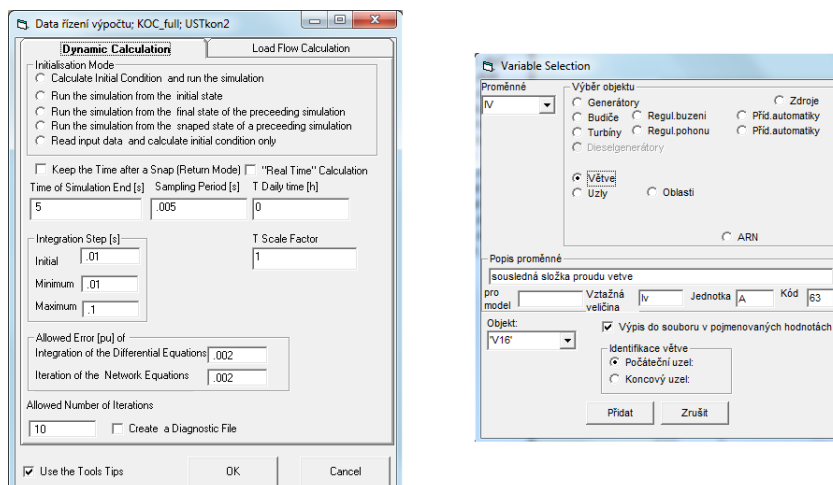
Tabulka 12 – Zkratové příspěvky pro případ jednofázového zkratu v daném uzlu:

FSLG v uzlu	I''_{k1}	zkratový příspěvek přitékající do místa zkratu					
		z větve	proud	z větve	proud	z větve	proud
W10	13.147	V11	4.366	V476	0.280	-	-
W11	13.233	V052A	2.440	V12	1.978	V11	0.300
W12	13.200	V051A	2.127	V12	1.831	V13	0.633
W13	13.145	V13	3.144	V14	1.229	V475	0.282
W14	13.122	V14	2.361	KSP	2.108	V15	0.320
W15	13.039	V15	4.439	T401	0.039	V16	0.283
W16	12.956	V16	4.393	V17	0.283	-	-
W17	12.874	V17	4.365	V474	0.283	-	-
W20	13.104	V20	4.368	-	-	-	-
W21	13.188	V052B	3.057	V21	1.405	V20	0
W22	13.158	V21	2.456	V22	1.943	V432	0.234
W23	13.151	V23	2.636	V22	1.849	V473	0.333
W24	13.167	V051B	2.596	V23	1.181	V24	0.710
W25	13.129	V24	2.920	KSP	1.494	V25	0.039
W26	13.045	V25	4.364	T402	0.039	V26	0
W27	12.963	V26	4.321	V27	0	-	-
W28	12.881	V27	4.294	-	-	-	-

Tabulka 12 zobrazuje hodnoty počátečního souměrného rázového zkratového proudu I''_{k1} pro případ simulace jednofázových zkratů. Hodnoty pro jednotlivé zkratové příspěvky přitékající do místa zkratu jsou pouze pro souslednou složku zkratového proudu.

3.3.2 Analýza rozložení proudů při zkratu v daném uzlu

Aby bylo možné zjistit rozložení zkratových proudů v rozvodně, bylo nutné provést detailní analýzu. Při dynamické simulaci je možno pomocí volby Modifikovat/Rízení výpočtu (Obrázek 28) zadat vzorkovací periodu Sampling Period pro výstup proměnných do grafiky, uživatelských souborů a kontrolu síťových veličin. Vzorkovací periodu jsem zadal $T_{\text{sampl}} = 0.005$ s. Vzorkovací perioda byla zadána nižší, což mělo za následek větší přesnost výpočtu. Analýzu rozložení proudů jsem provedl pomocí volby Modifikovat/Grafika a dialogem Přidat proměnnou přidáním jsem v dialogovém okně přidal proměnné do seznamu zobrazovaných proměnných v grafu. Zatrhл jsem také možnost Výpis do souboru v pojmenovaných hodnotách, kterým jsem docílil toho, že v textovém výstupním souboru hodnot grafu (.GR1) byly hodnoty proudů v jednotkách kA.

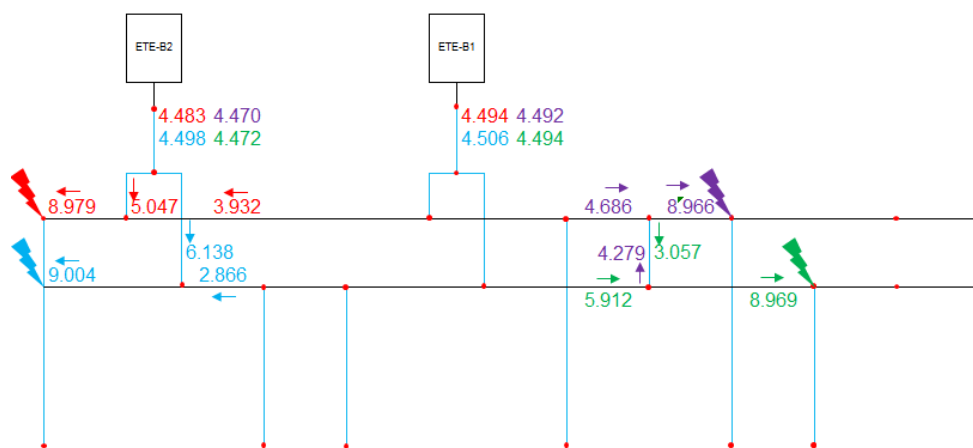


Obrázek 28 – Zadání vzorkovací periody.

Ve výstupním souboru jsem odečetl hodnoty zkratového proudu v čase zkratu $t_{FOUL} = 1$ s (kdy byl simulován zkrat). Tím, že byla snížena doba vzorkovací periody a zkratový proud odečten v čase zkratu jsou hodnoty zkratového proudu přesnější, v důsledku nepatrně větší. Z tohoto důvodu schéma (Obrázek 29) obsahuje hodnoty mírně odlišné při porovnání s hodnotami z výstupního souboru, které zobrazuje Tabulka 11. Tímto způsobem byla provedena analýza rozložení při zkratu pro všechna místa zkratu. Rozložení zkratových proudů pro zkraty v uzlu W10, W15, W20 a W26 zobrazuje Tabulka 13.

Tabulka 13 – Rozložení proudů při zkratu v uzlech W10, W15, W20 a W26:

	W10	W15	W20	W26
celkový	8.979	8.966	9.004	8.969
V051	4.494	4.492	4.506	4.494
V052	4.483	4.470	4.498	4.472
V051A	3.931	1.839	1.844	0.617
V051B	0.563	2.653	2.662	3.877
V052A	5.047	2.845	1.640	2.438
V052B	0.563	1.625	6.138	2.034
V11	8.979	0	0	0
V12	3.932	2.846	1.639	2.439
V13	0	4.685	0.204	3.056
V14	0	4.686	0	3.057
V15	0	8.966	0	0
V16	0	0	0	0
V17	0	0	0	0
KSP	0	4.279	0.204	3.057
V20	0	0	9.004	0
V21	0.563	1.625	2.866	2.034
V22	0.563	1.626	2.866	2.034
V23	0.563	1.626	2.866	2.034
V24	0	4.279	0.204	5.912
V25	0	0	0	8.969
V26	0	0	0	0
V27	0	0	0	0



Obrázek 29 – Zkratové příspěvky pro zkraty na W10, W15, W20 a W26.

3.3.3 Ekvivalentní oteplovací proud

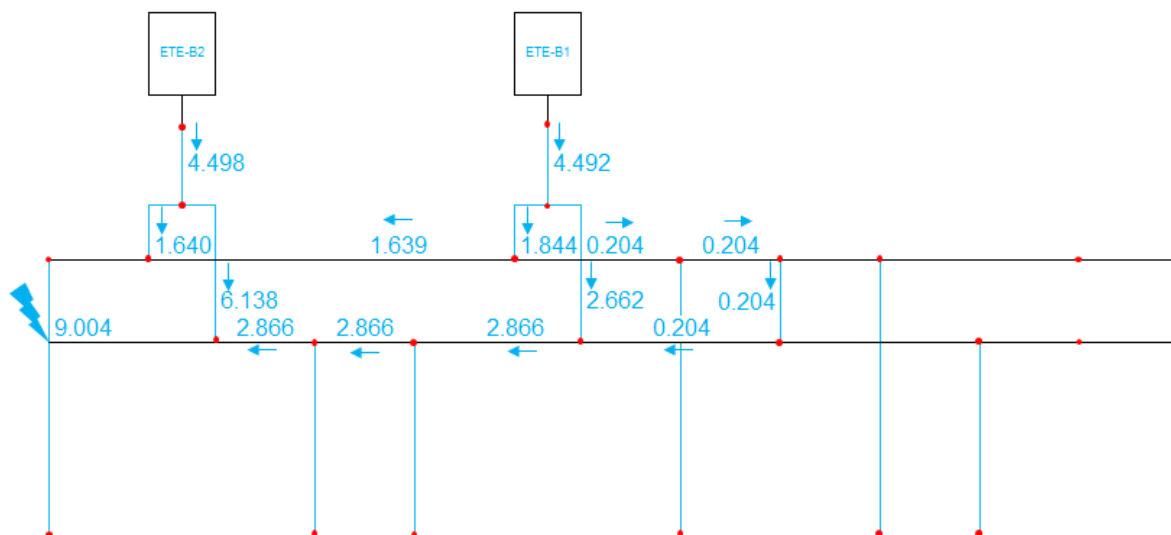
Aby bylo možno vypočítat hodnotu ekvivalentního oteplovacího proudu, byl z výstupního souboru (.SRC) odečten součinitel k_e . Dle vztahu (20) pro výpočet ekvivalentního proudu I_{th} je součinitel k_e vynásoben počátečním souměrným rázovým zkratovým proudem I_k'' a je vypočítána hodnota pro ekvivalentní oteplovací proud I_{th} . Detail výpočtu a hodnoty součinitele k_e jsou uvedeny v příloze. Vypočtené hodnoty ekvivalentního oteplovacího proudu I_{th} pro jednotlivé druhy zkratů zobrazuje *Tabulka 14*. Nejvyšší hodnoty ekvivalentního oteplovacího proudu I_{th} korespondují s největšími hodnotami pro počáteční rázový zkratový proud I_k'' , ze kterého je ekvivalentní oteplovací proud I_{th} vypočítán. Největší hodnotu ekvivalentního oteplovacího proudu I_{th} tedy představuje zkrat simulovaný v uzlu W12, stejně jako v případě výpočtu počátečního rázového zkratového proudu I_k'' .

Tabulka 14 – Ekvivalentní oteplovací proud pro jednotlivé druhy zkratů:

uzel	větev	FOUL	FSLG	F_LL	FDLG
W10	V11	15.494	21.036	12.439	12.439
W11	V12	15.554	21.173	12.476	12.476
W12	V13	15.556	21.120	12.479	12.479
W13	V14	15.528	21.031	12.456	12.456
W14	V15	15.517	20.994	12.447	12.447
W15	V16	15.469	20.860	12.410	12.410
W16	V17	15.436	20.727	12.375	12.375
W17	V17*	15.388	20.596	12.339	12.339
W20	V20	15.508	20.969	12.433	12.433
W21	V21	15.541	21.102	12.467	12.467
W22	V22	15.530	21.053	12.458	12.458
W23	V23	15.532	21.041	12.461	12.461
W24	V24	15.548	21.067	12.471	12.471
W25	V25	15.524	21.006	12.453	12.453
W26	V26	15.476	20.873	12.418	12.418
W27	V27	15.428	20.743	12.382	12.382
W28	V27*	15.381	20.613	12.348	12.348

3.3.4 Nejhorší místo vzniku zkratu

Nejhorší místo vzniku zkratu dle *Tabulka 13*, tudíž dle nejvyšší hodnoty počátečního souměrného rázového zkratového proudu I''_{k3} představuje zkrat v uzlu W20 s hodnotou zkratového proudu $I''_{k3} = 9.004$ kA a stejnou hodnotou zatížení pro větev V20. Zkratový proud I''_{k3} je složen ze zkratových příspěvků z větve V052B a V21. Pro lepší přehlednost a názornost je rozložení zkratových proudů pro nejhorší místo vzniku zkratu zobrazeno na následujícím schématu (*Obrázek 30*).



Obrázek 30 – Rozložení proudů při zkratu v uzlu W20.

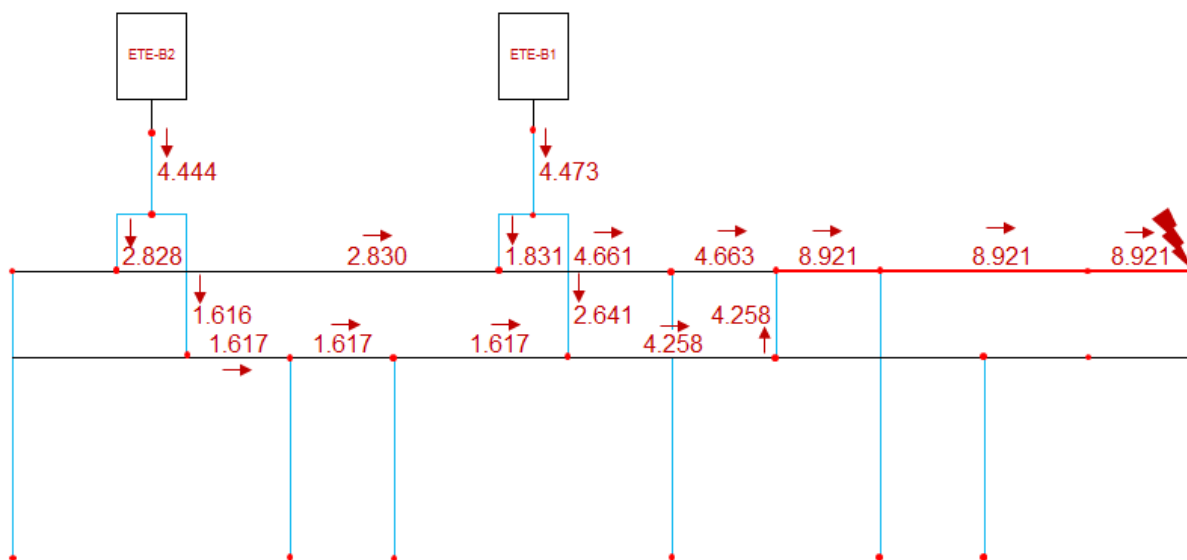
Ze schématu (*Obrázek 30*), které zobrazuje rozložení proudů při zkratu v uzlu W20 je patrné, že zatížení jednotlivých větví přípojníc je takřka rovnoměrné. Nejvíce jsou zatěžovány větve V052B proudem $I''_{k3} = 6.138$ kA a větev V20 proudem $I''_{k3} = 9.004$ kA. Již v kapitole 3.2.3 z *Tabulka 7*, která zobrazuje hodnoty pro počáteční souměrný rázový zkratový proud I''_{k3} je patrné, že velikost proudu I''_{k3} se liší v desítkách ampér. Lze tedy se zanedbatelnou chybou konstatovat, že hodnoty počátečního souměrného rázového zkratového proudu I''_{k3} jsou stejné pro všechna místa vzniku zkratu v uzlu na propojených přípojnících. Toto tvrzení je zároveň opodstatněné i tím, že zdroje (bloky ETE-B1 a ETE-B2) představují skoro stejné zkratové příspěvky pro jakékoliv místo vzniku zkratu na přípojnici.

Daleko horší místa vzniku zkratu představují zkraty simulované v uzlu W17 a W28, což jsou zkraty na konci přípojníc W1 a W2. Rozložení zkratových proudů zobrazuje *Tabulka 15*.

Tabulka 15 – Rozložení proudů při zkratu v uzlech W17 a W28:

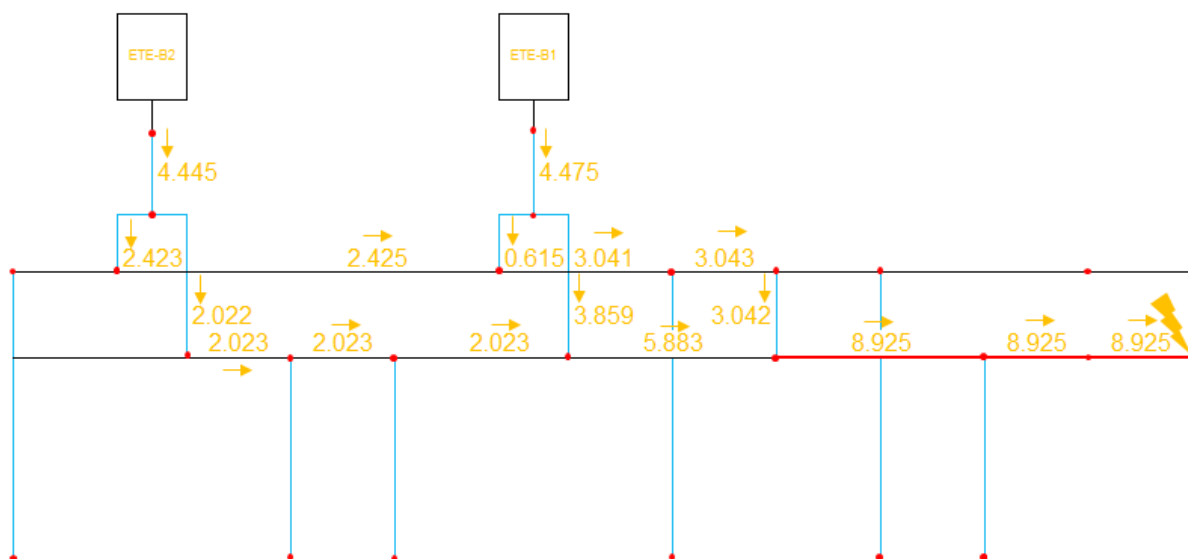
	W17	W28			
celkový	8.921	8.925	V15	8.921	0
V051	4.473	4.475	V16	8.921	0
V052	4.444	4.445	V17	8.921	0
V051A	1.831	3.859	KSP	4.258	3.042
V051B	2.641	0.615	V20	0	0
V052A	2.828	2.022	V21	1.616	2.023
V052B	1.616	2.423	V22	1.617	2.023
V11	0	0	V23	1.617	2.023
V12	2.83	2.425	V24	4.258	5.883
V13	4.661	3.041	V25	0	8.925
V14	4.663	3.043	V26	0	8.925
			V27	0	8.925

Rozložení zkratových proudů ukazuje, že v případě simulace zkratu v uzlu W17 jsou celkem tři větve V15, V16 a V17 zatěžovány proudem $I''_{k3} = 8.921$ kA. Rozložení zkratových proudů se zaznačením směru proudů zobrazuje následující schéma (Obrázek 31). Červeně jsou zde vyznačeny úseky přípojníc, které jsou nadměrně zatěžovány.



Obrázek 31 – Rozložení proudů při zkratu v uzlu W17.

Při simulaci vzniku zkratu v uzlu W28 jsou nejvíce zatěžovány větve V25, V26 a V27 proudem $I''_{k3} = 8.925 \text{ kA}$.



Obrázek 32 – Rozložení proudů při zkratu v uzlu W28.

Velikost počátečního souměrného rázového zkratového proudu I''_{k3} se i při simulaci vzniku zkratu v uzlech W17 a W28 liší v jednotkách ampér. Velikost zkratového proudu I''_{k3} není nejvyšší, ale rozložení proudů není rovnoměrné a přípojnice jsou nadměrně zatěžovány velkým zkratovým proudem v úseku od kombinovaného spínače přípojnic až po konec přípojnice, což představuje skoro polovinu délky přípojnice. Z tohoto důvodu jsou na nejvíce zatížené úseky přípojnic proudů připojeny nejméně významné odbočky. Pokud dojde ke zkratu na přípojnici, transformátor T401, tlumivka a vedení V474 mohou být vypínačem vypnuty a za beznapětového stavu odpojeny pomocí PDP od postižené části přípojnice.

4 Rekonstrukce a rozšíření rozvodny Kočín 420 kV pro případ dostavby JETE

S rozšířením projektu pro případ dostavby souvisí několik zásadních otázek. V této kapitole bych rád zmínil všechny důležité události související s dostavbou JETE. Klíčovým datem bylo 10. dubna 2014, kdy bylo oznámeno ukončení tendru na dostavbu JETE v důsledku nízkých cen elektrické energie, které ohrožují ekonomickou návratnost investic do energetických zdrojů. V době vypsání tendru se cena elektřiny na burze pohybovala kolem 80 € za megawatthodinu, nyní ale klesla k 30 € a špatný je i výhled pro další vývoj. Aby se dostavba vyplatila, potřeboval by ČEZ ceny přes 70 € za megawatthodinu. Rozhodujícím bylo také rozhodnutí vlády, která sice podpořila rozvoj jaderné energetiky, ale bez státních záruk. Je možné, že za 15-20 let může být cena elektřiny jinde, nemyslím si však, že vzroste zhruba na dvojnásobek současné ceny, která by zajistila návratnost projektu dostavby JETE. Z mého pohledu má však dostavba JETE i důležitý strategický význam. V současné době máme elektrické energie dostatek, ale nemusí to tak být vždy. Elektrárny stárnou technicky i morálně, končí jejich životnost a nemusí již vyhovovat novým přísnějším evropským normám. Nové zdroje tedy budeme potřebovat. Otázkou jaký typ zdrojů to bude, bychom se měli intenzivně zabývat. [10]



Obrázek 33 – Vývoj ceny elektrické energie.

Otázku energetického mixu řeší Státní energetická koncepce, konkrétně její aktualizace. MPO předložilo ASEK vládě během minulého roku, koncepce však doposud nebyla vládou schválena. ASEK obsahuje šest základních variant dlouhodobého vývoje české energetiky do roku 2040. Definiuje, jaká bude strategie ohledně zajištění bezpečné dodávky energie, udržitelného rozvoje a jak bude chráněna konkurenceschopnost energetiky a průmyslu. Nejpravděpodobnější je varianta, nazvaná optimalizovaný scénář, kdy výroba elektřiny má do značné míry spoléhat na jadernou energetiku. Zatímco dnes jádro dodává 33 % elektrické energie, do roku 2040 by to mělo být 50 %. Což znamená, že je nutná stavba tří nových jaderných reaktorů. Postavěny by měli být dva nové bloky v Temelíně a jeden v Dukovanech. Zatím ale není jasné financování výstavby. [11]

Dalším důležitým dokumentem je Národní akční plán rozvoje jaderné energetiky v ČR, který slíbili vypracovat premiér Bohuslav Sobotka a ministr MPO při zrušení tendru na dostavbu

3. a 4. Bloku JETE. Tento plán je však jen přehled jednotlivých variant řešení a nezabývá se klíčovými otázkami výběru konkrétního investičního a obchodního modelu pro výstavbu nových jaderných zdrojů. Příprava výstavby nových jaderných zdrojů by měla začít dle tohoto plánu v roce 2015, ale se spuštěním se počítá až v roce 2035. Což znamená, že potencionální dodavatelé pro výstavbu nových jaderných zdrojů neobdrží žádné zakázky v horizontu minimálně deseti let. Nejdelší dobu výroby představuje tlaková nádoba reaktoru, ale při plánovaném spuštění v roce 2035 nemá smysl zahajovat výrobu dříve, než v roce 2029. Pro potencionální dodavatele bude tedy velký problém udržet know-how výroby a kvalifikovaný personál. Důležitá je taky v rámci vývoje jaderné energetiky ČR skutečnost, že v následujících letech bude dosaženo projektové životnosti jaderné elektrárny Dukovany. První blok má povolení do konce roku 2015, druhý a třetí do roku 2016 a čtvrtý blok do konce 2017. Dá se předpokládat, že Dukovany získají licenci k provozu na další rok, dva, možná i deset let. Musíme ale také počítat s tím, že v horizontu následujících let můžeme přijít o roční výrobu 15 TWh. Potom bychom neexportovali žádné přebytky a museli bychom spoléhat na import nebo na tepelné elektrárny spalující hnědé uhlí. Diskuze o prolomení těžebních limitů, která v současné³ době probíhá, by pak byla zbytečná a limity bychom museli prolomit. [12]

Nutno poznamenat, že jaderná energetika je zároveň oblast velmi citlivá, co se týče mezinárodních vztahů. V současné době jaderná energetika představuje pro EU významný energetický zdroj zajišťující zhruba čtvrtinu výroby elektřiny. Nicméně ze 132 aktuálně provozovaných evropských jaderných reaktorů bude více než 40 % do roku 2025 provozováno čtyřicet let. Je tedy otázkou, jakým směrem se bude evropská energetika ubírat. Významným milníkem byla havárie v jaderné elektrárně Fukušima, na základě které dnes většina Evropanů vnímá jaderné elektrárny jako zdroje s rizikovou technologií. V souvislosti s touto havárií například Německo obrátilo svoji energetickou koncepci a rozhodlo se od energie ze zdrojů jaderných a fosilních přejít na obnovitelné zdroje energie (tzv. Energiewende). Cílem Německa je ukončit výrobu ve všech jaderných elektrárnách a do roku 2050 vyrábět energii především z obnovitelných zdrojů, což bude mít podstatný vliv i na evropskou energetiku.

Zmínil jsem, že se spuštěním dalších bloků JETE se počítá až v roce 2035. Dovolte mi tedy otázku, možná troufalou. Budeme další jaderné bloky potřebovat? Ano, jak jsem zmínil, nové zdroje samozřejmě potřebovat budeme. Jaký zdroj by to měl ale být? Rok 2035 je ještě daleko. Co když Německá Energiewende z pohledu budoucnosti představuje daleko větší potenciál. V Česku je nyní situace taková, že slova obnovitelné zdroje, speciálně fotovoltaika způsobují velké pozdvižení. Celá tato oblast má hanlivou nálepku v souvislosti s poskytovanou státní podporou (dotační podmínky a garantované výkupní ceny pro solární elektrárny). Panuje zde představa, že obnovitelné zdroje jsou drahé a zvedají cenu elektřiny. Já si však myslím, že decentralizace má smysl a decentralizované lokální zdroje, například solární panely na střeše rodinného domu, se vyplatí již dnes a to i bez dotací.

Z hlediska rozšíření projektu rozvodny Kočín 420 kV v MODES je otázka nových jaderných zdrojů podstatná. Je zejména třeba odpovědět na otázky kolik nových bloků bude potřeba případně z JETE vyvést a o jaké se bude jednat bloky z hlediska dodávaného výkonu.

³ Duben 2015

V dalších podkapitolách této práce se budu zabývat právě vyvedením nových jaderných bloků, dále pak posouzením zkratové odolnosti a v poslední kapitole zmíním jedno z možných řešení pro úpravu rozvodny Kočín 420 kV.

Je obtížné, ne-li zcela nemožné v současné situaci odhadnout, jak se situace ohledně dostavby JETE bude vyvíjet v horizontu následujících let. Proto budu v další části této diplomové práce uvažovat s výstavbou dvou jaderných bloků o výkonu 2x 1700 MW.

4.1 Vyvedení nových jaderných zdrojů JETE 3 a 4

Vyvedení výkonu jaderných elektráren do PS je řešeno podle přísných požadavků, kdy základním požadavkem je omezení možnosti šíření poruch a jejich důsledků jak mezi bloky a PS, tak mezi bloky navzájem. Při vyvedení nových jaderných zdrojů existují z mého pohledu dvě základní varianty, jak je možné vyvedení JETE 3 a 4 realizovat. První variantou je vyvedení nových jaderných zdrojů do stávající rozvodny Kočín 420 kV, kdy bude nutné provést rekonstrukci a rozšíření rozvodny. Druhou variantou je výstavba zcela nové rozvodny, ta však přináší hned několik problému. Tím zásadním je podle mě výkup pozemků a s tím spojené majetkoprávní vztahy. Daleko pravděpodobnější je tedy varianta první, kdy však bude nutné překontrolovat zkratovou odolnost rozvodny a dotčených vedení. V případě rozvodny je třeba zkontrolovat dimenzování přístrojů a zařízení rozvodny zejména z hlediska zkratových proudů. U vedení je třeba zkontrolovat především průřez a maximální zatížení za normálního provozního i poruchového stavu.

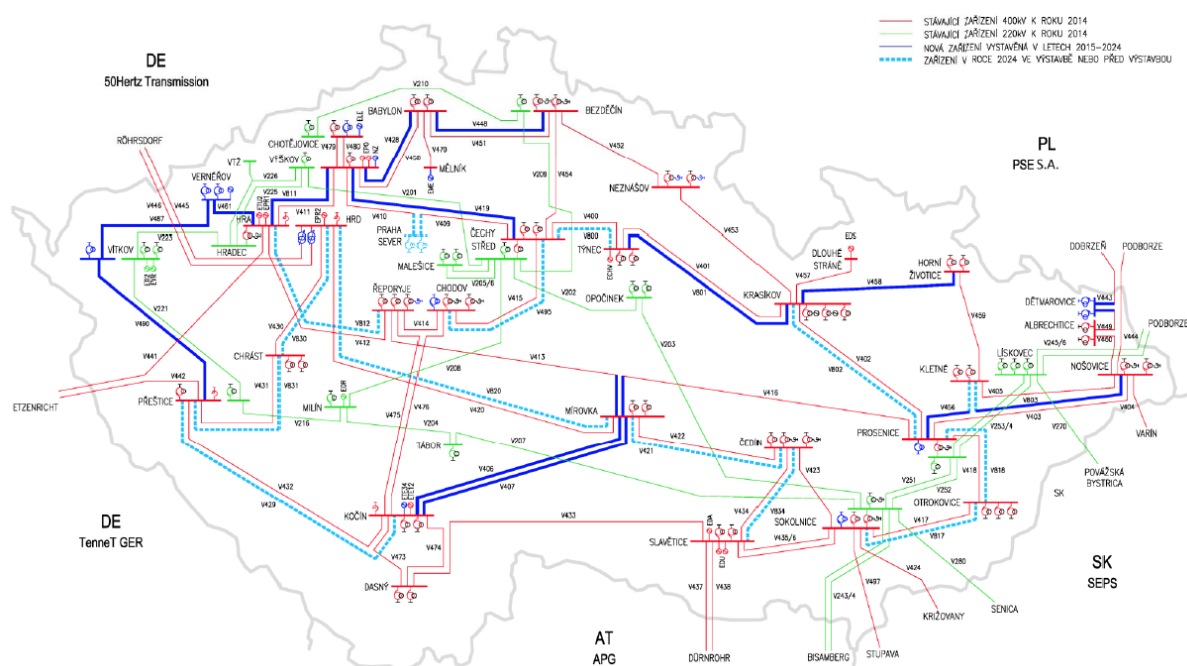
Dokument z roku 2013 Plán rozvoje přenosové soustavy České republiky 2014-2023 [13], který vydala společnost ČEPS, a. s. počítá s variantou výstavby dvou nových bloků s výkonem $P = 1700$ MW. Tento výkon nabízel v rámci tendru reaktor EPR 1600 od francouzské společnosti Areva. Ta však byla z tendru na dostavbu JETE vyřazena. [14] O této skutečnosti při tvorbě dokumentu Plán rozvoje přenosové soustavy České republiky 2015-2024 [14] společnost ČEPS, a.s. věděla, stejně jako o zrušení tendru. Z dokumentu je však patrné, že je těžké z hlediska budoucího vývoje určit směr, jakým se bude dostavba JETE ubírat. Proto ČEPS tedy počítá s variantou, kdy by byly vyvedeny do rozvodny Kočín 420 kV dva nové bloky s výkonem od 2x 1200 MW do 2x 1700 MW. V dokumentu Plán rozvoje přenosové soustavy České republiky 2015-2024 [14] jsou v rámci strategického investičního plánu definovány nutné investiční opatření, které souvisí s vyvedením dvou nových bloků:

- Výstavba nového dvojitého vedení 400 kV Kočín – Mírovka (V406/407),
- Zasmyčkování stávajícího vedení Řeporyje – Prosenice (V413) do rozvodny Mírovka,
- Zdvojení stávajícího vedení 400 kV Kočín – Přeštice (V432/429),
- Zdvojení stávajícího vedení 400 kV Mírovka – Čebín (V422/421),
- Rozšíření rozvodu 400 kV Přeštice, Mírovka a Čebín,
- Rekonstrukce a rozšíření rozvodny 420 kV Kočín na vyšší zkratovou úroveň.

Na základě nutných investičních opatření se však dá předpokládat, že rozvodna Kočín, ani PS není v současné době připravena na vyvedení tak velkého výkonu, jaký představují další dva bloky JETE. Mohlo by tedy docházet k přetěžování stávajících vedení a tím neplnění

bezpečnostního kritéria N-1⁴. Při vyvedení výkonu z jaderných zdrojů je však vyžadováno zároveň i bezpečnostní kritérium N-2⁵. V případě vyvedení nových jaderných zdrojů do stávající rozvodny Kočín 420 kV bude nutno provést rozšíření a rekonstrukci rozvodny. V rámci PS bude nutné provést výstavbu nových vedení.

Ze strategického investičního plánu je patrné, že akcí spojených s výstavbou nových jaderných bloků je velké množství. Ze zmíněných akcí je rekonstrukce rozvodny Kočín 420 kV plánovaná na roky 2016-2020. Zasmyčkování vedení Řeporyje – Prosenice (V413) do rozvodny Mírovka je naplánováno na roky 2016-2017 a výstavba nového dvojitého vedení 400 kV Kočín – Mírovka (V406/407) se připravuje až na rok 2021-2024. Pro ostatní akce není zatím konkrétní datum definováno. Nutné však poznamenat, že akce v rámci strategického investičního plánu nesouvisí pouze s výstavbou nových bloků JETE a proto práce na některých akcích budou započaty již v tomto roce. [15]



Obrázek 34 – Schéma přenosové sítě ČR po realizaci plánovaných investičních akcí.

4.2 Posouzení zkratové odolnosti rozvodny

V případě vyvedení nových bloků do nadřazené rozvodny Kočín 420 kV je především nutné zkontrolovat, zda jsou přístroje a zařízení vyhovující z hlediska zkratové odolnosti rozvodny. Současná zkratová odolnost rozvodny je 50/125 kA. Zkratovou odolnost definuje ČSN 38 1754 z roku 1974 doporučenými hodnotami jmenovitých vypínacích a dynamických proudů (Tabulka 16). V rozvodnách na napěťové hladině o jmenovitém napětí $U_n = 400$ kV, které tvoří uzly PS je zkratová odolnost většinou 50/125 kA. Nejdůležitějším parametrem pro elektrická rozvodná zařízení, která slouží k rozdělování elektrické energie a jejímu rozvodu do jednotlivých větví PS, je právě zkratová odolnost a jmenovité napětí. [19]

⁴ Kritérium "N-1": Schopnost ES udržet normální parametry chodu i po výpadku libovolného prvku (např. vedení, transformátoru, bloku apod.), přičemž může dojít ke krátkodobému lokálnímu omezení spotřeby.

⁵ Kritérium "N-2": Zvýšené kritérium spolehlivosti provozu. Schopnost ES udržet normální parametry chodu i po výpadku dvou prvků (např. vedení, transformátoru, bloku apod.) pro vyvedení výkonu z jaderných elektráren ETE a EDU.

Tabulka 16 – Doporučená řada zkratových odolností:

Jmenovitý vypínací proud (kA)	6.3	8	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63
Jmenovitý dynamický proud (kA)	16	20	31.5	40	50	63	80	100	125	160

Uvedený dynamický proud je vypočítán ze vztahu:

$$I_{dyn} = 1,8 \times \sqrt{2} \times I_{n\text{ vyp}} \quad (4.1)$$

Hodnoty zkratových odolností lze předurčit na základě napěťové hladiny.

Tabulka 17 – Parametry rozvodných zařízení:

Jmenovité napětí	Nejvyšší provozní napětí	Jmenovitý vypínací proud	Jmenovitý dynamický proud	Rázový zkratový výkon
kV	kV	kA	kA	MVA
110	123	16	40	3048
		25	63	4763
		40	100	7621
		50	125	9526
		63	160	12003
220	145	16	40	6097
		25	63	9526
		40	100	15242
		50	125	19052
		63	160	24006
400	420	25	63	17320
		40	100	27713
		50	125	34641
		63	160	43648

Z hlediska zkratové odolnosti musí být zajištěno, aby rozvodna byla dimenzována na hodnotu vyšší, než je součet zkratových příspěvků zdrojů a zkratových příspěvků ze sítě. Dále by se během projektování a dimenzování mělo počítat s určitou rezervou. Neustále totiž dochází k rozvoji PS, i proto ČEPS počítá s rezervou zkratové odolnosti minimálně 15 %. Jak vyplývá z předchozí kapitoly (4.1), při vyvedení dvou nových jaderných bloků do rozvodny Kočín 420 kV by došlo k tomu, že současná zkratová odolnost 50/125 kA by nevyhovovala a je nutné provést rekonstrukce a rozšíření rozvodny na vyšší zkratovou úroveň 63/160 kA. Rozvodna Kočín 420 kV by se tak stala první rozvodnou v rámci PS se zkratovou úrovní 63/160 kA, což znamená, že by byla schopna čelit rázovému zkratovému výkonu $S''_{k3} = 43648$ MVA.

4.3 Navrhovaná úprava rozvodny Kočín

Z pohledu zkratových proudů je vhodnou úpravou rozvodny Kočín 420 kV docíleno toho, aby výsledné zkratové proudy, byly ve všech částech přípojníc co nejmenší a byla zajištěna rovnoměrnost zkratových proudů v rozvodně. Toho je docíleno vhodným uspořádáním přípojníc a polí rozvodny.

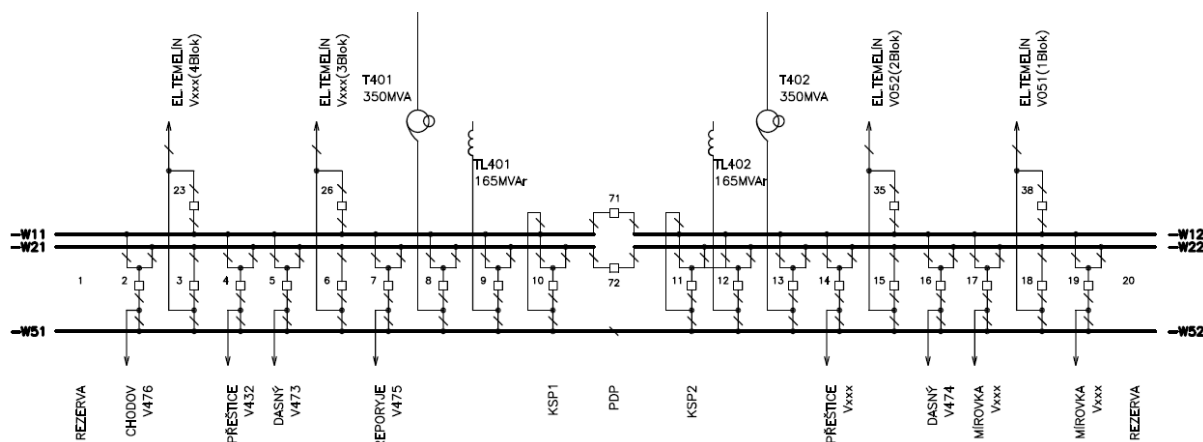
Navrhovaná úprava rozvodny zároveň respektuje stávající umístění vedení, aby bylo minimalizováno křížení vedení. Dalším kritériem, které je nutno respektovat, je realizace přepojení. Vhodná předpříprava zajistí, aby k beznapětovému stavu došlo jen v případě realizace přepojení. Rovněž případná provizorní přeústění v době výstavby rozvodny je nutno navrhnout tak, aby co největší část zařízení mohla být využívána i pro budoucí provoz po ukončení výstavby celé rozvodny.

V případě rozšíření je nejlepší možnou variantou rozvodnu Kočín 420 kV rozšířit východním směrem a vybudovat nová pole rozvodny. Do nově vybudovaných polí přeústit bloková vedení V051 a V052. V rámci zachování normálního provozního stavu, by bylo vhodné, aby byla bloková vedení přeústěna v rámci plánované odstávky bloků ETE-B1 a ETE-B2 tak, aby nebylo nutné odstavovat bloky JETE kvůli přeústění. Následně do uvolněných polí zaústit nová bloková vedení bloků ETE-B3 a ETE-B4. Z jižní strany stávající vedení V476, V432, V473 a V475 a ponechat na svých pozicích. V474 stejně jako nová vedení V406, V407, V429 zaústit do nově vybudované části rozvodny. V konečném zapojení bude rozvodna Kočín 420 kV obsahovat dvě přípojnice hlavní a jednu přípojnicí pomocnou v klasickém zapojení, blokové vývody budou v zapojení 2 vypínače na odbočku. Finální uspořádání polí rozvodny po dokončení rozšíření je zobrazeno na jednopólovém schématu rozvodny (*Obrázek 35*) a obsazení jednotlivých polí definuje *Tabulka 18*.

Tabulka 18 – Obsazení polí rozvodny:

pole č.	typ odbočky	označení
1	rezerva	
2	vývod Chodov	V476
3,23	blokový vývod el. Temelín (blok 4)	V054
4	vývod Přeštice	V432
5	vývod Dasný	V473
6,26	blokový vývod el. Temelín (blok 3)	V053
7	vývod Řeporyje	V475
8	transformátor 400/110 kV	T401
9	tlumivka 400 kV	TL401
10	kombinovaný spínač přípojníc	KSP1
71,72	podélné dělení přípojníc	PDP
11	kombinovaný spínač přípojníc	KSP2
12	tlumivka 400 kV	TL402
13	transformátor 400/110 kV	T402
14	vývod Přeštice	V429
15,35	blokový vývod el. Temelín (blok 2)	V052
16	vývod Dasný	V474

17	vývod Mírovka	V406
18,38	blokový vývod el. Temelín (blok 1)	V051
19	vývod Mírovka	V407
20	rezerva	



Obrázek 35 – Jednopolové schéma rozvodny Kočín 420 kV po rekonstrukci a rozšíření.

Tímto uspořádáním polí a přípojníc je docíleno, že v případě zkratu budou zkratové proudy rozloženy rovnoměrně a postižené úseky přípojníc budou zatěžovány nejmenším možným zkratovým proudem. Nově vystavená část rozvodny (pravá část od pole PDP 71 a 72 na Obrázek 35) po kompletním rozšíření a rekonstrukci bude zrcadlovou kopií strany levé, která je takřka totožná se současně provozovanou rozvodnou Kočín 420 kV. Po rekonstrukci a rozšíření rozvodny je vyvedení bloků JETE realizováno vyvedením blokových vývodů V053 a V054 do levé části rozvodny na přípojnice W11 a W21 a vyvedením stávajících blokových vývodů V051 a V052 do pravé části rozvodny na přípojnice W12 a W22. V případě vzniku zkratu na konci přípojce W11 v blízkosti PDP (což do jisté míry představuje stejnou situaci jako zkrat v uzlu W17 v kapitole 3.2) bude značná část přípojnice W11 zatěžována velkým zkratovým proudem. Kdyby nebyly pole PDP 71 a 72 osazeny vypínačem došlo by k tomu, že celkový zkratový proud v místě vzniku zkratu by byl součtem zkratových příspěvků z přípojnice W11 a W12. V případě zkratu však pravděpodobně dojde k tomu, že PDP konkrétně vypínač v poli 71 rozdělí přípojnice W11 a W12. Postižená přípojnice W11 je pak pomocí dalších manipulací vyřazena z provozu a odbočky připojené na tuto přípojnici jsou přepojeny.

5 Závěr

Hlavním cílem práce bylo vytvořit model rozvodny Kočín 420 kV v síťovém simulátoru MODES, následně na základě simulací a vypočtených hodnot pro všechny druhy zkratu určit nejhorší místo vzniku zkratu v uzlu na propojených přípojnících. V poslední části navrhnout rozšíření modelu rozvodny Kočín 420 kV pro případ dostavby JETE s ohledem na zkratové proudy při nasazení všech uvažovaných zdrojů JETE a pro rozvodnu Kočín 420 kV v základním zapojení.

V první části diplomové práce bylo především popsáno na zjednodušeném modelu rozvodny Kočín 420 kV vytvoření nového projektu v síťovém simulátoru MODES. Zjednodušený model byl následně rozšířen dle aktuálního provozního stavu rozvodny Kočín 420 kV. V případě tvorby nového projektu se vyskytl problém při zadání vstupních parametrů pomocí dialogů. Což bylo vyřešeno tak, že vstupní parametry byly zadávány v režimu textového editoru. Dalším problémem byla stabilita software, kdy při určitých krocích MODES padal a byl nutný jeho restart. V této souvislosti bych apeloval na nutnost ukládání každého dílčího kroku při tvorbě nového projektu či případu. V závěru tvorby nového modelu byl problém s ukládáním více případů v rámci jednoho projektu. MODES nebyl schopen uložit scénář pro daný případ, pravděpodobně z důvodu příliš velké velikosti adresáře vst, ve kterém jsou uloženy vstupní data. Po vymazání starých vstupních souborů, které nebyly při výpočtu používány, bylo docíleno toho, že MODES odlišné scénáře v rámci jednotlivých případů již ukládal. Dále byl v první části práce proveden výpočet počátečního souměrného rázového zkratového proudu I''_{k3} pro třífázový zkrat na přípojnici dle ČSN EN 60909-0 a prostřednictvím dynamické simulace v MODES. Výsledky počátečních souměrných rázových zkratových proudů I''_{k3} byly porovnány a byla ověřena správnost vytvořených modelů v SW MODES.

Ve druhé části diplomové práce byla prostřednictvím simulací zkratů v SW MODES na vytvořeném modelu rozvodny Kočín 420 kV vypočtena průměrná hodnota jednofázového počátečního rázového zkratového proudu $I''_{k1} = 13.088$ kA a třífázového počátečního rázového zkratového proudu $I''_{k3} = 8.964$ kA na propojených přípojnících W1 a W2. Nejvyšší hodnotu počátečního souměrného rázového zkratového proudu I''_{k3} představuje zkrat v uzlu W12 $I''_{k3} = 8.997$ kA a nejnižší hodnotu zkrat v uzlu W28 $I''_{k3} = 8.902$ kA. Hodnoty zkratového proudu I''_{k3} se liší z důvodů vzdálenosti zkratu (detailně popsáno v podkapitole 3.2.3.2). Se zanedbatelnou chybou lze konstatovat, že hodnoty počátečního souměrného rázového zkratového proudu I''_{k3} jsou stejné pro všechny místa zkratu v uzlu na propojených přípojnících. Dle velikosti třífázového počátečního rázového zkratového proudu I''_{k3} pro jednotlivé uzly bylo určeno nejhorší místo vzniku zkratu. V souvislosti s určením nejhoršího místa vzniku zkratu v uzlu na přípojnících byly přípojnice, které představují uzly, v rámci rozšířeného modelu rozděleny na několik větví, což je z technického pohledu netypické. Tento krok byl nutný k určení místa vzniku zkratu v uzlu na propojených přípojnících, protože MODES neumožňuje simulaci zkratu v uzlu a nebylo by zároveň možné zjistit, která část přípojnice je nejvíce namáhána. Nejhorší místo vzniku zkratu představují zkraty simulované v uzlu W17 a W28, kdy hodnoty počátečního souměrného rázového zkratového proudu I''_{k3} nejsou nejvyšší, ale rozložení zkratových proudů na přípojnících není rovnoměrné. Přípojnice W1 (respektive W2) je nadměrně zatěžována velkým zkratovým proudem v úseku

od kombinovaného spínače přípojníc až po konec přípojnice, což představuje skoro polovinu délky přípojnice.

Třetí část práce se zabývala rekonstrukcí a rozšířením rozvodny pro případ dostavení JETE s uvažováním dalších 2 jaderných zdrojů vyvedených do rozvodny Kočín 420 kV o maximálním možném výkonu 2x 1700 MW a provozem rozvodny Kočín 420 kV v základním zapojení. Byly popsány možné faktory ovlivňující dostavbu JETE. Následně byla posouzena současná zkratová odolnost rozvodny 50/125 kV. V případě vyvedení dvou nových jaderných bloků by současná zkratová odolnost nevyhovovala a je nutné ji navýšit na úroveň 63/160 kA. V posledním kroku bylo vhodným uspořádáním přípojníc a polí rozvodny Kočín 420 kV docíleno toho, že v případě zkratů v polích rozvodny budou zkratové proudy v úsecích přípojníc rozloženy rovnoměrně, postižené úseky přípojníc budou zatěžovány nejmenším možným zkratovým proudem a bude zajištěna větší bezpečnost provozu. Při zkratu v polích rozvodny bude vyšší pravděpodobnost odpojení zkratu vypínačem v poli a nižší pravděpodobnost odpojení části přípojnice nejbližšími vypínači. V případě zkratu v poli mezi vypínačem a hlavní přípojnící bude možno po odpojení přípojnicového odpojovače uvést zkratem odpojenou část přípojnice brzy do provozu a teprve potom odstraňovat následky poruchy v odpojeném poli. Pro případy zkratů v poli mezi vypínačem a hlavní přípojnící a zkratů na přípojnících jsou podélně rozdělené přípojnice spojeny spínačem přípojníc s vypínačem, což umožní oddělit zdravé, nepostižené části přípojníc s polovinou generátorů JETE. Zároveň jsou všechny elektrárenské bloky v rozvodně vyvedeny přes 2 vypínače na obě sběrný. Proto při odpojení jedné části postižené přípojnice nebude nutno odpojovat zbylé elektrárenské bloky, pouze bude třeba s nimi sjet na nižší výkon z důvodu omezení vývodu vyvedení výkonu JETE v rozvodně Kočín 420 kV přes jeden vypínač.

Z pohledu dalšího rozšíření stávajícího modelu v MODES se nabízí možnost rozšířit model o rozšířenou část rozvodny Kočín 420 kV dle navrhovaného schématu (podkapitola 4.3). Pro případ zkratu v uzlu na propojených přípojnících uvažovat zkratové příspěvky plánovaných bloků 3 a 4 JETE a na základě dynamické simulace ověřit vliv na rozložení zkratových proudů v rozvodně Kočín 420 kV po rekonstrukci a rozšíření. V této souvislosti je však nutné znát vstupní parametry, konkrétně výkon plánovaných bloků 3 a 4 JETE.

Literatura

- [1] MÁŠLO, Karel. *Používání programu MODES pro výpočet přechodných dějů v elektrizační soustavě: Uživatelská příručka programu MODES 2.3*
- [2] HONIŠ, René; KONEČNÝ, Milan; GALETKA, Martin; ULLMAN, Ivo. *Přenosová soustava České republiky*. Ostrava: Moravskoslezský energetický klastr, 2014. 52 s. ISBN 987-80-905329-3-5
- [3] FENCL, František. *Elektrická rozvodná zařízení*. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1991, 217 s. ISBN 80-01-00676-1
- [4] KRYCHTÁLEK, Zbyněk; PAUZA, Josef. *Elektrické stanice*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989, 413 s.
- [5] ČEPS, a.s., *Místní provozní bezpečnostní předpis – TR Kočín*. Praha, 2014.
- [6] RUSEK, Stanislav. *Teoretická elektroenergetika: učební texty*. VŠB-TUO, 2002
- [7] MÁŠLO, Karel. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. Praha: Asociace energetických manažerů, 2013. 272 s. ISBN 978-80-260-4461-1
- [8] ČSN EN 60909-0. *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – Část 0: Výpočet proudů*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [9] ČSN 33 3020. *Výpočet poměrů při zkratech v trojfázové elektrizační soustavě*. Praha: Český normalizační institut, 1988
- [10] E15.CZ. *ČEZ zrušil obří tendr na dostavbu Jaderné elektrárny Temelín*. [online]. [cit. 2015-02-03]. Dostupné z: <http://zpravy.e15.cz/byznys/prumysl-a-energetika/cez-zrusil-obri-tendr-na-dostavbu-jaderne-elektrarny-temelin-1076759>
- [11] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Aktualizace státní energetické koncepce České republiky*. Praha: MPO, 2014
- [12] Ministerstvo financí. *Národní akční plán rozvoje jaderné energetiky v ČR*. Praha: MF, 2015
- [13] ČEPS, a.s., *Plán rozvoje přenosové soustavy České republiky 2014-2023*. [online]. [cit. 2015-03-23]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/>
- [14] ČEZ. *Areva nesplnila požadavky veřejné zakázky na stavbu bloků Temelín 3 a 4, ČEZ musel tohoto uchazeče vyřadit*. [online]. [cit. 2015-03-23]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/pro-media/aktualni-temata/28.html>
- [15] ČEPS, a.s., *Plán rozvoje přenosové soustavy České republiky 2015-2024*. [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/>
- [16] MÁŠLO, Karel. *Popis modelování přechodných dějů v ES MODES*. 2001
- [17] MACH, Veleslav. *Srovnání programu EMTP-ATP a MODES*. [online]. [cit. 2014-10-23]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~mah30/>
- [18] MACH, Veleslav. *Práce začátečníka s programy MODES a EMTP-ATP*. [online]. [cit. 2014-10-23]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~mah30/>
- [19] ČSN 38 1754. *Dimenzování elektrického zařízení podle účinku zkratových proudů*. Praha: Český normalizační institut, 1974

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Letecký snímek Elektrické stanice Kočín. [5].....	3
Obrázek 2 – Schéma zaústění stávajících vedení.	4
Obrázek 3 – Jednopolové schéma rozvodny Kočín 420 kV.....	4
Obrázek 4 – Schéma zjednodušeného modelu rozvodny Kočín 420 kV.....	6
Obrázek 5 – Zadání parametrů pro odběrový uzel CHD4.....	6
Obrázek 6 – Zadání parametrů pro napájecí uzel ETE1.	7
Obrázek 7 – Výpis souboru UST.DAT zobrazující zadané parametry pro všechny uzly.	7
Obrázek 8 – Zadání parametrů větve.....	8
Obrázek 9 – Náhradní schéma modelu větve pro transformátor (původní schéma vlevo, náhradní schéma v poměrných hodnotách vpravo).	9
Obrázek 10 – Zadání parametrů pro typ větve Trafo.	9
Obrázek 11 – Zadání parametrů pro synchronní generátor.	12
Obrázek 12 – Editor modelu bloků.	13
Obrázek 13 – Výpis parametrů ze souboru NESYM.DAT pro nulovou a zpětnou složku.	13
Obrázek 14 – Náhradní schémata transformátorů v nulové složkové soustavě.	14
Obrázek 15 – Uvažovaný základní provozní stav.	15
Obrázek 16 – Schéma rozšířeného modelu rozvodny Kočín 420 kV.	16
Obrázek 17 – Ustálený chod zjednodušeného modelu rozvodny Kočín 420 kV.....	17
Obrázek 18 – Ustálený chod bloku ETE-B1 a ETE-B2.	17
Obrázek 19 – Ustálený chod rozšířeného modelu rozvodny Kočín 420 kV.	18
Obrázek 20 – Průběh zkratového proudu z ideálního napěťového zdroje.....	19
Obrázek 21 – Místo vzniku zkratu.....	21
Obrázek 22 – Náhradní schéma uvažovaného zkratového příspěvku jednoho bloku JETE. ...	21
Obrázek 23 – Event Selection (vlevo) a Object Selection (v pravo).	25
Obrázek 24 – Výpis hodnot při jednofázovém zkratu.	26
Obrázek 25 – Výpis hodnot při třífázovém zkratu na přípojnici W v rámci zjednodušeného modelu.	27
Obrázek 26 – Hodnoty zkratových proudů pro uzel W11 a W12 v blízkosti napájecích uzlů..	28
Obrázek 27 – Přehled druhů zkratů.....	30
Obrázek 28 – Zadání vzorkovací periody.	33
Obrázek 29 – Zkratové příspěvky pro zkraty na W10, W15, W20 a W26.....	34
Obrázek 30 – Rozložení proudů při zkratu v uzlu W20.....	35
Obrázek 31 – Rozložení proudů při zkratu v uzlu W17.....	36
Obrázek 32 – Rozložení proudů při zkratu v uzlu W28.....	37
Obrázek 33 – Vývoj ceny elektrické energie.....	38
Obrázek 34 – Schéma přenosové sítě ČR po realizaci plánovaných investičních akcí.	41
Obrázek 35 – Jednopolové schéma rozvodny Kočín 420 kV po rekonstrukci a rozšíření.	44

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Obsazení polí rozvodny.....	5
Tabulka 2 - Parametry vedení	8
Tabulka 3 – Základní parametry transformátoru T401 a T402	9
Tabulka 4 – Převod T401 a T402	11
Tabulka 5 – Parametry pro blok ETE-B1 a ETE-B1	12
Tabulka 6 – Složení přípojníc.....	15
Tabulka 7 – Třífázový zkrat na přípojnících W1 a W2	27
Tabulka 8- Porovnání s výpočtem dle ČSN EN 60909-0	28
Tabulka 9 – Výpočet poruchové impedance.....	29
Tabulka 10 – Nesymetrické poruchy na přípojnících W1 a W2	29
Tabulka 11 – Zkratové příspěvky pro případ třífázového zkratu v daném uzlu.....	31
Tabulka 12 – Zkratové příspěvky pro případ jednofázového zkratu v daném uzlu.....	32
Tabulka 13 – Rozložení proudů při zkratu v uzlech W10, W15, W20 a W26.....	33
Tabulka 14 – Ekvivalentní oteplovací proud pro jednotlivé druhy zkratů.....	34
Tabulka 15 – Rozložení proudů při zkratu v uzlech W17 a W28.....	36
Tabulka 16 – Doporučená řada zkratových odolností.....	42
Tabulka 17 – Parametry rozvodných zařízení.....	42
Tabulka 18 – Obsazení polí rozvodny.....	43

